



Apprentissage multisensoriel de lettres et de formes abstraites chez les jeunes enfants et les adultes

Anne Hillairet de Boisferon

► To cite this version:

Anne Hillairet de Boisferon. Apprentissage multisensoriel de lettres et de formes abstraites chez les jeunes enfants et les adultes. Psychologie. Université de Grenoble, 2010. Français. NNT: . tel-00649864

HAL Id: tel-00649864

<https://theses.hal.science/tel-00649864>

Submitted on 8 Dec 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université de Grenoble

Ecole Doctorale Ingénierie pour la Santé, la Cognition et l'Environnement
Laboratoire de Psychologie et NeuroCognition (CNRS UMR 5105)

THESE

Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Grenoble

Spécialité : Sciences cognitives, Psychologie & Neurocognition

Apprentissage multisensoriel de lettres et de formes abstraites chez les
jeunes enfants et les adultes.

Présentée par

Anne HILLAIRET de BOISFERON

Sous la direction de Pascale Colé et Edouard Gentaz

Composition du Jury

Liliane Sprenger-Charolles	DR	CNRS – Université Paris Descartes	Rapporteur externe
Michel Fayol	PU	Université de Clermont-Ferrand II	Rapporteur externe
Jean-luc Velay	CR	CNRS - Université de la Méditerranée	Examineur
Philippe Dessus	PU	Université de Grenoble II	Examineur
Pascale Colé	PU	Université de Provence	Examineur
Edouard Gentaz	DR	CNRS - Université de Grenoble II	Examineur

Résumé

Pour apprendre à lire dans un système d'écriture alphabétique, les enfants doivent comprendre que les lettres (graphèmes) de l'écrit représentent les sons (phonèmes) de l'oral. Comprendre et apprendre ces nouvelles associations ainsi qu'automatiser leur utilisation nécessite plusieurs années d'enseignement spécifique. Des études ont montré que des méthodes précoces de préparation aux apprentissages qui renforcent les liens entre les compétences perceptives et motrices sollicitées lors de l'apprentissage conjoint de la lecture et de l'écriture seraient particulièrement efficaces. L'objectif principal de ce travail a été de comprendre la manière dont une exploration manuelle haptique de lettres cursives favorisait le décodage de pseudo-mots et la fluidité des tracés chez des enfants de grande section de maternelle. Nous avons donc comparé des entraînements multisensoriels, impliquant la modalité haptique et visuelle dans le travail d'exploration des lettres, à des entraînements unimodaux visuel ou haptique. Ce travail a été réalisé à travers deux axes : d'une part, chez des enfants de grande section de maternelle confrontés aux graphèmes et phonèmes, et d'autre part, chez des adultes confrontés à un nouvel apprentissage de formes abstraites et stimuli auditifs totalement inédits. Les résultats révèlent que l'activité motrice autour des lettres et des formes abstraites ne permet pas, malgré des mouvements d'exploration intimement liés à leur configuration spatiale, de favoriser leur mémorisation. Toutefois, nous mettons en évidence de manière robuste un meilleur apprentissage des associations entre les formes et les sons après une exploration visuelle et haptique des formes. De surcroît, cette amélioration ne serait pas uniquement due à la séquentialité de l'exploration induite par la modalité haptique, mais bien à la motricité elle-même. La modalité haptique pourrait donc servir de « ciment » entre les stimuli visuels et auditifs. Enfin, familiariser les enfants au geste d'écriture de lettres cursives, via une exploration haptique guidée (par un bras robot à retour de force), permet d'améliorer la fluidité de l'écriture. Présenter un patron de lettre à la fois statique et dynamique permettrait aux enfants d'assimiler certaines règles motrices de production (ordre de production, cinématique) et d'acquérir une représentation motrice plus complète de la lettre. L'ensemble des résultats suggère une influence significative de l'exploration haptique de lettres dans l'apprentissage de la lecture et de l'écriture et encourage donc sa prise en compte dans des entraînements visant à préparer ces apprentissages.

Mots-clés : Entraînement multisensoriel ; Apprentissages ; Lecture ; Ecriture ; Lettres ; Modalité haptique

Abstract

Learning to read in an alphabetic system requires children to understand that letters (graphemes) in written language correspond to sounds (phonemes) in oral language. To learn these novel associations requires several years of specific instruction. Using some methods early on to prepare children for this seems efficient, where the methods are designed to reinforce the link observed between perceptive and motor abilities during reading and handwriting acquisition. The main goal of this work was to understand the way manual haptic exploration of cursive letters can enhance pseudo-words decoding and handwriting fluidity in letters production in senior kindergarten children. To do so, we compared multisensory trainings involving haptic and visual modalities, in the proposed motor activities around the letters, to visual or haptic unisensory trainings. This work was realised according to two axes: for the first, in senior kindergarten children shown graphemes and phonemes, and for the second, in adults shown a new learning of unseen abstract forms and auditory stimuli. Results reveal that motor activity around letters and abstract forms does not enhance participant's memorisation despite exploratory motions intimately related to their shapes. Nevertheless, we showed in a robust way a more important associative learning of letters and sounds after a visuo-haptic exploration of letters. In addition, this enhancement is not only due to a more sequential exploration induced by the haptic modality but more to the motor activity *per se*. Haptic modality could be at the origin of a “binding” effect between visual and auditory stimuli. Finally, getting children into the habit of handwriting motion of cursive letters via a haptic exploration (arm robot device), enhances their handwriting fluidity. Demonstration of a static and dynamic model of letters could help children in the acquisition of some motor rules production (as strokes order and kinematics) and in the construction of more complete motor representations of letters. Taken together, results suggest a significant impact of the haptic exploration of letters in acquiring the skills of reading and handwriting and add weight to the suggestion that haptic exploration should be used in training programs designed to prepare children for acquiring these skills.

Key words: Multisensory training; Acquisition; Reading; Handwriting; Letters; Haptic modality

Financements

Cette thèse a été financée par une allocation de recherche du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. Elle a été réalisée au sein du Laboratoire de Psychologie et de NeuroCognition (CNRS UMR 5105) et de l'Ecole Doctorale Ingénierie pour la Santé, la Cognition et l'Environnement.

La recherche présentée concernant l'apprentissage du geste d'écriture chez les enfants a fait l'objet d'un projet spécifique de collaboration avec Bernard Hennion, Philippe Gouagout et Nicolas Tarrin de France Télécom Recherche et Développement. Ce projet a permis de réaliser la conception technique de l'interface haptique.

Ce travail a également bénéficié du soutien du Plan Pluri-formations "Interactions Multimodales" de l'université de Grenoble.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes deux directeurs de recherche sans qui ce travail n'aurait pas été possible. Edouard Gentaz pour m'avoir toujours poussé à aller de l'avant avec enthousiasme. Merci pour ta bonne humeur et ton optimisme naturel. Merci à Pascale Colé pour sa rigueur et sa recherche de cohérence. Merci également Pascale pour ta disponibilité et ta gentillesse.

Je remercie les membres du jury, Liliane Sprenger-Charolles, Michel Fayol, Jean-Luc Velay et Philippe Dessus pour avoir accepté de lire et d'évaluer ce travail.

Un grand merci à Claire Leroy pour son aide plus que précieuse. Merci de m'avoir initiée « aux joies de la GRH ». J'espère avoir été une digne descendante de la lignée des « boulets ». Je remercie également Anne Chabaud pour sa gentillesse, sa disponibilité et son aide.

J'adresse mes remerciements à toutes les personnes avec qui j'ai pu collaborer lors de la réalisation des différentes études présentées dans cette thèse : Julien Bara, Sébastien Boisard, David Méary, Jérémy Bluteau, Richard Palluel-Germain, Florence Barra, Nicolas Tarrin et Philippe Gouagout. Merci également à l'ensemble des participants – élèves, enseignants, étudiants – d'avoir accepté de prendre part à ces études.

Je tiens à remercier et exprimer mon amitié à l'ensemble des membres du LPNC. Merci pour leur accueil et leur grande disponibilité durant toutes ces années. Les échanges ont toujours été agréables et enrichissants, tant au niveau personnel que professionnel. Merci à Sylviane, Cédric, Elsa, Richard, Karine, Aurélie C, Alan, Julien D, Stéphane, Françoise, Eric, David A. Je souhaite également étendre mes remerciements à l'aile C et D du BSHM. Merci aux membres du LIP et du LSE.

Je tiens aussi à ouvrir une session spéciale « jeunes chercheurs » et doctorants, leur exprimer ma reconnaissance et toute mon amitié. Merci à Solène K, Carole P, Emilie, Serban, Sylvain, Marc, Martine, Caroline P, Aurélie D, Baptiste, Emmanuelle, Dominique, Cécile, Marie-Pierre Muriel. Merci à mes nombreux co-bureau passés et présents du 222bis. Je citerai pêle-mêle Fleur, Lucie B, Yanica, Jennifer, Alice, Benoît M, Mathilde, Gaëtan, Marcela, Solène A, Nicolas et Benoît. J'ai une pensée toute particulière pour la fine équipe du 216bis : Marie, Elenitsa, Julien B, Julien O, Sébastien C, Benjamin. Evidemment on pourrait penser que ce travail de thèse est le fruit d'un labeur studieux de tous les instants, mais je retiendrai non sans émotion toutes nos incartades au rang desquelles je citerai le fameux « craquage de 17h15 », le concours de la FBI (non Julien on ne peut pas encoder un CD et valider un record) ou autres projets moins que plus (quoi que) en rapport avec nos activités de recherche.

Merci à Christophe pour la Nat' qui a été l'extension de ma terrasse pendant cette période estivale de rédaction.

Merci à mes amis qui ont partagé ma vie avant, pendant et j'espère la partageront après ma thèse.

Merci à Chloé et Nicolas, Raphaël, Matthieu, les années fac sont faites de belles rencontres. Merci à Julien, Dorothee, Lilie et Pierre, merci pour toutes ces discussions, fromage d'abondance et diverses noces. Merci à Julien, Pénélope et Giana, il est toujours agréable de pouvoir partager des moments, malheureusement trop rares, avec vous. Merci à mes sparring partners (pas uniquement) qui m'ont, entre autres, permis de ne pas dépérir: Pierre J, Cédric (ne nous remercie pas pour ton superbe surnom), Maud et Loïc. Je remercie également Jérémie et Cédric B au nom de la bande de C, que de moments mémorables. Merci à Lucie C, Thomas et Maë, il faudra quand même qu'un jour il fasse beau dans le nord-Isère. Evidemment je remercie Maud et par extension Henry (c'est bien parce que tu gères mon argent). Que dire, tant d'années d'amitiés et trois bises, je ne saurai t'exprimer ma Evidemment je me dois et je souhaite remercier le reste de la famille C : Marie, Benjamin, François et Nadine, pour nous avoir notamment souvent accueilli et bien plus longtemps qu'ils ne le souhaitaient ou imaginaient. Merci à Nadège, Bruno et Léo, que je connais depuis toujours (c'est plus facile pour Léo), je , pareil ! Merci à Camille, Clément, Pierre et Martine qui m'accueillent toujours avec gentillesse et bienveillance, nos séjours sont toujours ressourçants, Merci. Cette thèse n'aurait pas été ce qu'elle est sans le dévouement corps et âme du docteur Caudron. Si le travail venait à manquer je n'hésiterai pas à faire appel au docteur La rose pour ce poste de PC tant vanté. Merci Sébastien.

Merci à ma mère, mes sœurs Laure et Marion qui m'ont soutenu et surtout supporté mes longues périodes d'absence et de « mutisme ». Merci pour votre patience et amour inconditionnel. Je tiens à dédier ce manuscrit à mon père.

Enfin, je remercie Benjamin qui m'accompagne et me supporte (dans tous les sens du terme) depuis toutes ces années. Merci pour tout Benjamin, tout simplement.

Table des matières

<i>Résumé</i>	<i>i</i>
<i>Abstract</i>	<i>ii</i>
<i>Financements</i>	<i>iii</i>
<i>Remerciements</i>	<i>iv</i>
<i>Table des matières</i>	<i>v</i>
<i>Abréviations</i>	<i>ix</i>
<i>Préambule</i>	<i>- 1 -</i>
<i>Revue de littérature et perspectives théoriques</i>	<i>- 4 -</i>

Chapitre 1. Les modalités sensorielles et la reconnaissance des objets - 5 -

1.1 La reconnaissance unimodale –haptique ou visuelle– des objets	- 5 -
1.1.2 La reconnaissance des objets par notre système haptique.....	- 5 -
1.1.2.1 Les caractéristiques anatomo-fonctionnelles du système haptique manuel.....	- 5 -
1.1.2.2. La reconnaissance des formes tridimensionnelles.....	- 12 -
1.1.2.3. La reconnaissance des formes bidimensionnelles.....	- 14 -
1.1.3. La reconnaissance des objets par le système visuel.....	- 19 -
1.1.3.1 Les modèles template-matching.....	- 20 -
1.1.3.2 Les modèles de reconnaissance par composantes structurales.....	- 21 -
1.1.3.3 Le modèle « time course contingency ».....	- 23 -
1.1.3.4 L'apport des neurosciences dans la reconnaissance visuelle des objets.....	- 24 -
1.2 La reconnaissance multimodale des objets : interactions et intégrations multisensorielles	- 26 -
1.2.1 Interactions multimodales.....	- 27 -
1.2.1.1 La présentation multimodale de l'information.....	- 29 -
1.2.2 Les conditions de la réussite.....	- 31 -
1.2.2.1 L'impact des facteurs sensoriels.....	- 31 -
1.2.2.2 L'impact des facteurs cognitifs.....	- 32 -
1.2.3 L'intégration multisensorielle.....	- 34 -
1.2.3.1 La question de la dominance sensorielle.....	- 34 -
1.2.3.2 La valeur de fiabilité des modalités sensorielles.....	- 34 -
1.2.3.3 Les modèles d'intégration multisensorielle.....	- 35 -
1.2.3.4 Les bases neurales à l'origine de l'intégration multisensorielle.....	- 37 -
1.2.4 Les mécanismes de l'apprentissage multisensoriel.....	- 39 -

Chapitre 2. La lettre : un cas particulier d'apprentissage multimodal - 42 -

2.1 La lettre comme objet visuel et sensori-moteur particulier - 42 -

2.1.1 La perception visuelle des lettres - 42 -

2.1.1.1 Les modèles de la reconnaissance visuelle des lettres..... - 42 -

2.1.1.2 Les représentations abstraites de l'identité des lettres..... - 46 -

2.1.1.3 La reconnaissance des lettres est-elle l'étape initiale de la reconnaissance des mots écrits ?- 49 -

-

2.1.2 L'écriture (le tracé) des lettres - 51 -

2.1.2.1 Les règles de production motrice de l'écriture - 51 -

2.1.2.2 Les habiletés motrices..... - 57 -

2.1.3 L'intervention des processus moteurs dans le traitement visuel des lettres - 61 -

2.1.3.1 La perception visuelle des mouvements d'écriture - 61 -

2.1.3.2 La perception des lettres statiques..... - 62 -

2.2 Les modèles de la lecture experte et de son apprentissage..... - 67 -

2.2.1 La lecture experte..... - 67 -

2.2.1.1 Les modèles double-voie - 67 -

2.2.1.2 Les modèles connexionnistes..... - 68 -

2.2.1.3 Le modèle de détecteurs de combinaisons locales (LCD)..... - 69 -

2.2.2 L'apprentissage de la lecture - 71 -

2.2.2.1 Les modèles à « étapes »..... - 71 -

2.2.2.2 Les modèles analogiques - 72 -

2.2.2.3 Les modèles double-voie - 74 -

2.2.2.4 Les modèles connexionnistes..... - 74 -

2.3 Les compétences de littéracie précoce..... - 75 -

2.3.1 La conscience phonologique..... - 76 -

2.3.2 La connaissance des lettres - 77 -

2.3.2.1 La connaissance du nom des lettres - 78 -

2.3.2.2 La connaissance du son des lettres..... - 80 -

2.3.3 La dénomination rapide - 81 -

Chapitre 3. Les entraînements multisensoriels de la lecture - 84 -

3.1 Les entraînements classiques auditif et visuel..... - 84 -

3.1.1 Les entraînements phonologiques..... - 84 -

3.1.2 Les entraînements phonologiques associés à l'apprentissage des lettres et des correspondances lettres-sons. - 87 -

3.2 Les entraînements multisensoriels..... - 88 -

3.2.1 Les premières méthodes de remédiation..... - 88 -

3.2.2 Les entraînements multisensoriels chez les enfants âgés présentant des difficultés - 89 -

3.2.3 Les entraînements multisensoriels chez les jeunes enfants - 90 -

3.2.4 Les entraînements avec les dispositifs haptique - 94 -

3.3 Problématiques, objectifs et méthodes.....	98 -
<i>Etudes expérimentales.....</i>	<i>101 -</i>
Chapitre 4. Exploration haptique des lettres : séquentialité vs. motricité.....	102 -
Etude 1. Evaluation de l'effet de l'exploration séquentielle des lettres sur la compréhension et l'utilisation du principe alphabétique en grande section de maternelle	102 -
4.1 Introduction	102 -
4.2 Méthode.....	104 -
4.3 Résultats	112 -
4.4 Discussion	115 -
Chapitre 5. L'évaluation de la connaissance des lettres.....	119 -
Etude 2. La connaissance du nom et du son des lettres, habiletés métaphonémiques et capacités de décodage en grande section de maternelle	119 -
5.1. Introduction	119 -
5.2 Méthode.....	121 -
5.3 Résultats	125 -
5.4 Discussion	132 -
Chapitre 6. Exploration haptique de lettres et qualité des tracés	136 -
Etude 3. Evaluation de l'ajout d'un dispositif haptique dans l'exploration des lettres cursives sur la fluidité de l'écriture en grande section de maternelle.....	136 -
6.1 Introduction	136 -
6.2 Méthode.....	138 -
6.3 Résultats	144 -
6.4 Discussion	145 -
Chapitre 7. Exploration haptique de formes et apprentissage des associations forme-son ..	148 -
Etude 4. Evaluation de l'effet de l'exploration haptique de formes abstraites sur l'apprentissage d'associations arbitraires entre des formes et sons nouveaux chez l'adulte..	148 -
7.1 Introduction	148 -
7.2 Méthode.....	150 -
7.3 Résultats	154 -
7.4 Discussion	158 -
Chapitre 8. Exploration haptique de formes abstraites et reconnaissance visuelle	161 -
Etude 5. Comparaison d'un apprentissage multisensoriel (visuo-haptique) et d'apprentissages unimodaux, visuel et haptique, de formes abstraites sur leur reconnaissance visuelle ultérieure.....	161 -
8.1 Introduction	161 -
8.2 Méthode.....	163 -
8.3 Résultats	174 -
8.4 Discussion	179 -

<i>Discussion générale</i>.....	- 183 -
--	----------------

Chapitre 9. Discussion générale, perspectives et conclusions.....184

9.1 Un traitement séquentiel des lettres facilite-t-il l'apprentissage de la lecture ?.....- 186 -

9.1.1 Un traitement de l'information spatiale du « local vers le global » ne serait pas suffisant pour faciliter la perception des lettres	- 186 -
--	---------

9.2 Une exploration haptique des lettres permet-elle une meilleure connaissance des lettres ?- 187 -

9.2.1 Est-ce une question attentionnelle ?.....	- 187 -
---	---------

9.2.2 Est-ce dû à une meilleure mémorisation des formes ?	- 188 -
---	---------

9.2.2.1 Proposer une information globale de forme pourrait servir de guide à l'exploration haptique-	189 -
--	-------

9.2.2.2 Existe-t-il une reconnaissance plus rapide des stimuli?.....	- 190 -
--	---------

9.2.3 Une exploration haptique des lettres permet-elle une mémorisation de leur orientation ?	- 191 -
---	---------

9.3 Une exploration haptique des lettres joue-t-elle un rôle « ciment » entre les formes et les sons ?.....- 193 -

9.3.1 Existe-t-il une intégration multisensorielle de haut-niveau?	- 194 -
--	---------

9.4 Une exploration haptique de lettres permet-elle une amélioration des compétences motrices ?- 196 -

9.5 Conclusion- 199 -

<i>Références</i>.....	- 201 -
-------------------------------	----------------

<i>Table des illustrations</i>	- 219 -
---	----------------

<i>Annexes</i>.....	- 223 -
----------------------------	----------------

A. Matériel des prétests et post-tests, sessions d'entraînement et séance de révision (Etude 1)	- 224 -
---	---------

B. Matériel des tâches d'habiletés métaphonémiques et du décodage de pseudo-mots (Etude 2)	- 229 -
--	---------

C. Les 24 formes abstraites cibles (Etude 5).....	- 230 -
---	---------

D. Valorisation de la thèse	- 231 -
-----------------------------------	---------

E. Article 1 : Hillairet de Boisferon, Bara, Colé & Gentaz (2007)	- 233 -
---	---------

F. Article 2 : Hillairet de Boisferon, Colé & Gentaz (2010)	- 262 -
---	---------

G. Article 3 :Palluel-Germain, Bara, Hillairet de Boisferon, Hennion, Gouagout & Gentaz (2007)	- 284 -
--	---------

H. Article 4 :Fredembach, Hillairet de Boisferon & Gentaz (2009)	- 291 -
--	---------

I. Chapitre d'ouvrage : Hillairet de Boisferon, Bluteau & Gentaz (2010)	- 298 -
---	---------

Abréviations

NB : Les abréviations en italique sont liées aux statistiques présentées dans ce manuscrit.

AMS	Aire Motrice Supplémentaire
ANOVA	<i>Analyse de variance (analysis of variance)</i>
ANCOVA	<i>Analyse de covariance (Analysis of covariance)</i>
CPP	Cortex Pariétal Postérieur
CS	Colliculus Supérieur
CV	Consonne-Voyelle
<i>ddl</i>	<i>Degré de liberté</i>
<i>ES</i>	<i>Erreur-standard</i>
<i>ET</i>	<i>Ecart-type</i>
η^2	<i>Eta carré (taille de l'effet)</i>
EVIP	Echelle de vocabulaire en images Peabody
<i>F</i>	<i>Indice statistique suivant la loi de Fisher</i>
GSM	Grande Section de Maternelle
HVAM	Haptique-Visuel-Auditif-Métaphonémique
IPS	Sillon Intrapariétal
LOC	Complexe Latéral Occipital
<i>m</i>	<i>Moyenne</i>
MLE	Maximum Likelihood Estimate
<i>MSE</i>	<i>Carré moyen de l'erreur (Mean Square Error)</i>
<i>p</i>	<i>Probabilité associée à un indice statistique</i>
PM	Cortex Prémoteur
<i>r</i>	<i>Coefficient de corrélation</i>
RAN	Rapid Automatized Naming (dénomination automatique rapide)
RBC	Recognition by Components (reconnaissance par composantes)
SI	Cortex Somesthésique Primaire
SII	Cortex Somesthésique Secondaire
STS	Sillon Supra Temporal gauche
<i>t</i>	<i>Indice statistique suivant la loi de Student</i>
VAM	Visuel-Auditif-Métaphonémique
VC	Voyelle-Consonne
VWFA	Visual word Form Area (Aire de la forme visuelle des mots)
WPPSI	Wechsler Preschool and Primary Scale of Intelligence

Préambule

Lire et écrire est un facteur essentiel de l'intégration sociale, culturelle et économique des individus. La majorité des enfants normalement scolarisés apprend à lire et écrire avec succès au terme d'un apprentissage spécifique. Cependant, ces apprentissages et leur automatisation nécessitent plusieurs années d'enseignement. Par exemple, Graham, Berninger et Weintraub (2001) montrent que la graphie de certaines lettres reste difficile à acquérir jusqu'en troisième année de primaire. De plus, malgré les diverses adaptations des programmes et les progressions en matière de recherches sur les apprentissages scolaires, des difficultés persistent chez certains enfants. En 2005, le rapport de l'*Observatoire National de la Lecture* (ONL), adressé au Ministre de l'Éducation Nationale, fait état d'un nombre non négligeable d'enfants (20 à 25 %) qui ne sont pas encore des lecteurs assez entraînés pour lire seuls des textes (manuels scolaires) à l'entrée en classe de 6ème. Une partie de ces enfants (environ 10 à 15%) connaîtrait même des difficultés sérieuses. Parmi eux, 4 % n'auraient pas développé une bonne reconnaissance des mots écrits, capacité fondamentale de la lecture. Par ailleurs, la proportion des enfants considérés en « difficultés d'écriture » ou diagnostiqués dysgraphiques s'élève entre 10 et 30% selon l'âge et les critères d'évaluation choisis.

L'apprentissage formel de la lecture et de l'écriture débute en première année de primaire, toutefois, les enfants sont sensibilisés à l'écrit dès la maternelle. L'enfant y acquiert différentes compétences (vocabulaire, habiletés phonologiques, connaissance des lettres) en lien avec la réussite des apprentissages. D'après le *Bulletin Officiel* du 19 juin 2008, les enfants en fin de maternelle doivent être capables de : différencier les sons, reconnaître et écrire la plupart des lettres de l'alphabet, mettre en relation des sons et des lettres, copier en écriture cursive, sous la conduite de l'enseignant, de petits mots simples dont les correspondances entre lettres et sons ont été étudiées, et écrire en écriture cursive son prénom. Ainsi, l'école maternelle permet de préparer l'apprentissage de la lecture et de l'écriture. Cette période est considérée par certains auteurs comme critique pour les apprentissages (Ehri, Nunes, Stahl, & Willows, 2001). De plus, le choix de la méthode d'apprentissage serait crucial pour les enfants à risque d'échec en lecture ou en écriture (Snowling, 1996). Certains auteurs proposent de préparer l'apprentissage de la lecture en s'inspirant de méthodes multisensorielles initialement proposées dans le cadre de la remédiation des difficultés d'apprentissage (Bara, Gentaz, & Colé, 2007; Bara, Gentaz, Colé, & Sprenger-Charolles, 2004; Gentaz, Colé, & Bara, 2003). Plus précisément, ils proposent d'ajouter une exploration

haptique¹ de lettres, dans un entraînement de préparation à la lecture chez des enfants scolarisés dans des classes de grande section de maternelle. Bien que les résultats montrent un bénéfice sur les performances en décodage de pseudo-mots, la nature précise des processus mis en œuvre dans la perception haptique de lettres fait encore l'objet de débats.

Le travail présenté dans cette thèse a pour objectif général d'évaluer le rôle de la modalité haptique dans la préparation à la lecture et à l'écriture chez des enfants de grande section de maternelle. Cette recherche a donc un intérêt à la fois théorique et pédagogique. D'une part, elle vise l'apport de nouveaux éléments de compréhension dans la mise en place de l'apprentissage de la lecture et de l'écriture, et plus particulièrement sur le rôle que peut y jouer la modalité haptique. D'autre part, elle répond à une véritable préoccupation pédagogique de trouver de nouveaux outils de préparation des apprentissages, comme en témoigne par exemple l'enquête de l'ONL (2008) adressée aux enseignants des classes de maternelle concernant « les outils d'accompagnement des apprentissages de la langue ».

Au cours de ce travail, nous allons donc nous intéresser à la possibilité d'obtenir des informations concernant les lettres par divers systèmes sensoriels (visuel, auditif et haptique), comme c'est notamment le cas lors de l'apprentissage conjoint de la lecture et de l'écriture. Dans un premier temps, nous allons considérer la manière dont les modalités visuelle et haptique permettent d'appréhender et de traiter les propriétés des objets (au sens large) pour les reconnaître. Puis, nous verrons comment les personnes peuvent bénéficier de ces entrées sensorielles multiples par l'étude des modèles d'intégration multisensorielle et des apprentissages multimodaux (Chapitre 1). Dans le chapitre 2, notre attention se portera vers les compétences nécessaires à l'acquisition de la lecture. Nous nous intéresserons notamment à la lettre qui apparaît comme un objet singulier multimodal. En effet, si on prend en compte qu'une lettre peut être entendue et prononcée (composante auditive), lue (composante visuelle) et tracée (composante sensorimotrice) ; elle constitue ainsi un véritable objet multisensoriel. Nous nous intéresserons particulièrement aux composantes visuelle et sensorimotrice des lettres, et à leurs interactions, à travers l'étude de la reconnaissance visuelle et de la production des lettres. Notre intérêt se portera également sur les modèles de la lecture et de son apprentissage ainsi qu'à la place qu'ils accordent au traitement des lettres. Le chapitre 3 est consacré aux différentes méthodes d'entraînement de la lecture. Nous

¹ La perception haptique ou tactilo-kinesthésique est issue de la stimulation de la peau résultant des mouvements actifs d'exploration de la main entrant en contact avec les objets (Hatwell, Streri & Gentaz, 2000).

insisterons particulièrement sur les entraînements multisensoriels, leurs caractéristiques, effets et interprétations.

Tout au long de ce travail doctoral, nous nous sommes intéressés au rôle de la modalité haptique dans des entraînements de préparation à la lecture et à l'écriture. Plus précisément, nous souhaitons déterminer la manière dont l'exploration haptique de lettres favorise le décodage des pseudo-mots et le tracé des lettres. Pour cela, nous avons proposé de comparer des entraînements multisensoriels, impliquant la modalité haptique et visuelle dans le travail d'exploration des lettres, à des entraînements unimodaux visuel ou haptique. L'ensemble des objectifs de ce travail et les méthodes utilisées seront plus précisément décrits à la fin du chapitre 3.

Les résultats expérimentaux sont rapportés dans les cinq chapitres suivants. Le chapitre 4 interroge le rôle de la séquentialité de l'exploration des lettres dans les effets bénéfiques des entraînements multisensoriels. Le chapitre 5 présente une série de tâches évaluant les compétences de littéracie précoce² et le niveau de décodage des enfants, afin de mieux comprendre l'intérêt des mesures de la connaissance des lettres. Le chapitre 6 vise à étudier, au cours d'une étude plus appliquée, un dispositif haptique (bras robot à retour de force) destiné à améliorer la qualité du tracé de lettres cursives. Les chapitres 7 et 8 s'intéressent, chez des adultes, aux mécanismes à l'origine des bénéfices de l'ajout de la modalité haptique dans une exploration de lettres, et en particulier à son implication dans la mémorisation de la forme des lettres et dans le liage des lettres aux sons. Enfin, les différents résultats sont discutés après chacune des études et plus largement au cours du chapitre 9.

² Les compétences de littéracie précoce (de l'anglais *emergent literacy*) sont l'ensemble des habiletés, connaissances et attitudes qui sont nécessaires au traitement de l'écrit et qui sont liées à l'acquisition de la lecture et de l'écriture.

Revue de littérature et perspectives théoriques

Chapitre 1.

Les modalités sensorielles et la reconnaissance des objets

« Rien dans notre intelligence qui ne soit passé par nos sens »
Aristote, *Métaphysique*.

Les objets de notre environnement sont multidimensionnels. Ils peuvent se caractériser par différentes propriétés comme la forme, la taille, la texture, la couleur ou encore le son qui leur est associé. Afin de percevoir un objet comme un tout unifié et interagir avec lui, les différentes propriétés doivent être extraites et traitées par une ou plusieurs modalités sensorielles. Il est donc nécessaire de coordonner ces informations en provenance des différents systèmes sensoriels : visuel, auditif ou tactile. Nous verrons plus loin que cette perception multisensorielle des objets, qui est plutôt la règle que l'exception, offre de nombreux bénéfices perceptifs (Hatwell, 1994). Ces bénéfices n'existent pas seulement parce que les différentes modalités sensorielles peuvent appréhender diverses propriétés d'un objet mais également parce qu'elles peuvent s'intéresser conjointement à une même propriété pour enrichir notre expérience perceptive. Afin de mieux comprendre la contribution de chacune des modalités sensorielles à la perception, nous allons, dans un premier temps, nous intéresser à la perception unimodale haptique, puis visuelle, des objets au sens large, chez les adultes et les enfants. Dans le cadre de ce travail de thèse, les lettres comme objets particuliers seront traitées dans le chapitre 2.

1.1 La reconnaissance unimodale –haptique ou visuelle– des objets

1.1.2 La reconnaissance des objets par notre système haptique.

1.1.2.1 Les caractéristiques anatomo-fonctionnelles du système haptique manuel

Brefs descriptifs des bases neurales du sens haptique

Le *système haptique* associe les sens tactile (cutané) et kinesthésique. La main est l'organe perceptif tactile privilégié pour la perception haptique en raison de sa mobilité et de la densité des récepteurs sensoriels qui couvrent sa surface. Lorsque la peau entre en contact avec la surface d'un objet, les récepteurs tactiles distribués sous la peau (derme) récoltent des informations dites cutanées liées à leurs déformations mécaniques. Il existe quatre types de

mécanorécepteurs cutanés définis par la taille de leurs champs récepteurs et leur vitesse d'adaptation aux stimulations (Figure 1). Les récepteurs superficiels impliqués dans le toucher épicrotique sont les corpuscules de Meissner et les disques de Merkel. Les récepteurs de Meissner sont des détecteurs de vitesse et coderaient les mouvements sur la surface de la peau. Les récepteurs de Merkel, sensibles à l'intensité et la durée de la stimulation, seraient impliqués dans le codage des caractéristiques spatiales des stimuli. Les récepteurs contribuant au toucher protopathique, situés plus en profondeur, sont les corpuscules de Pacini et de Ruffini. Les récepteurs de Pacini sont sensibles aux vibrations et seraient impliqués dans le codage des attributs temporels du stimulus. Enfin les récepteurs de Ruffini sont sensibles à l'étirement de la peau et détecteraient les forces tangentielles (Halata & Baumann, 2008; Roll, 1994).

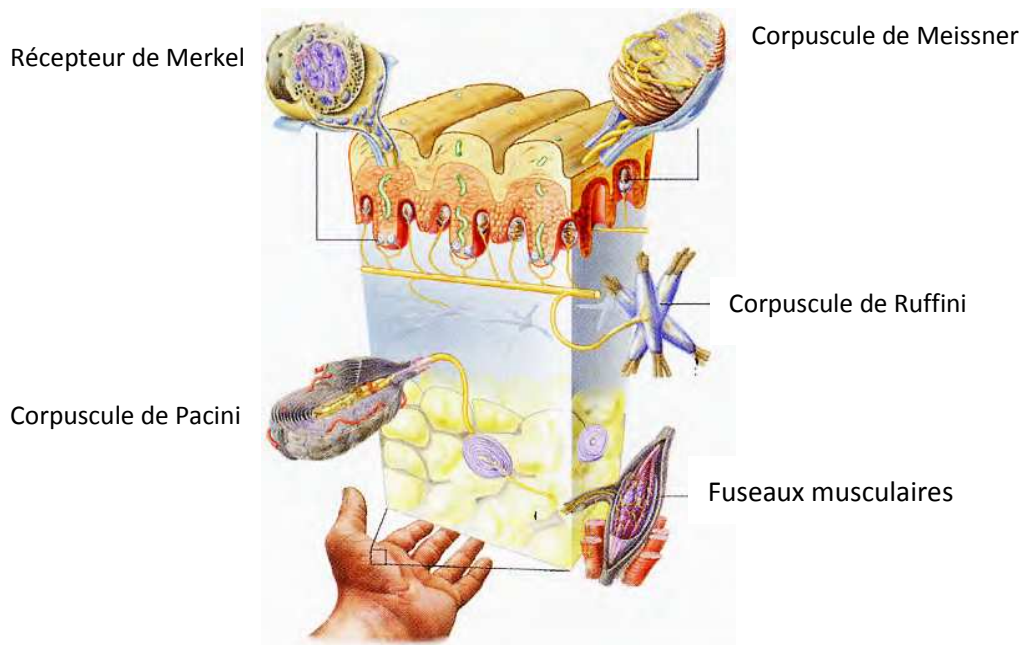


Figure 1. Schématisation des mécanorécepteurs de la peau et des muscles de la main [Adapté de Halata et Baumann, 2008].

Les informations sur la position et le mouvement des segments corporels sont décrites par les récepteurs sensoriels présents dans les muscles (les fuseaux neuromusculaires), aux jonctions musculo-tendineuses (les organes tendineux de Golgi) et dans les capsules articulaires et les ligaments (les corpuscules de Ruffini, Golgi et Pacini). Les fuseaux neuromusculaires sont sensibles à l'étirement du muscle et deux types de fibres nerveuses sensorielles acheminent les informations vers les centres nerveux. Les fibres Ia (grand diamètre et seuil d'excitabilité faible) sont sensibles aux variations d'allongement musculaire (vitesse d'étirement, sensibilité dynamique) ainsi qu'à la perception de longueur du muscle

(sensibilité statique). Les fibres Ia participent donc à la kinesthésie (sens du mouvement) et au sens de la position, la statesthésie. Les fibres II (petit diamètre et seuil d'excitabilité élevé) sont davantage sensibles à la longueur qu'à la variation d'étirement ; elles participent donc essentiellement au sens de la position. Les récepteurs tendineux réagissent à la contraction des muscles et informent (fibres Ib) sur le niveau de tension du muscle (niveau de force développée) et ses variations dans le temps. Enfin, le rôle des récepteurs articulaires est plus discuté dans la littérature, ils fourniraient principalement des informations relatives à la position, à la direction, et à la vitesse du déplacement angulaire des articulations.

Dans ce cadre, obtenir des informations sur les propriétés externes d'un objet, via le système haptique, suppose d'exploiter et interpréter les informations en provenance des divers récepteurs mécaniques internes.

Des récepteurs haptiques aux aires cérébrales somesthésiques

Lorsque les récepteurs cutanés et musculo-tendineux sont stimulés, ils transmettent un message sensoriel (transduction) au système nerveux central par deux voies ascendantes majeures : la *voie lemniscale* et la *voie extralemniscale*, qui permettent une sélection et une orientation des messages sensoriels vers les zones corticales de traitement spécifique (ces deux voies se séparent dès leur entrée dans la moelle épinière). La voie extralemniscale, composée des cordons antéro-latéraux de la substance blanche, transmet lentement (8 à 40 m/s) un large éventail d'informations qui concerne les sensibilités thermique, douloureuse et tactile grossière. Le croisement avec l'axe médian s'effectue au niveau de la moelle épinière et les informations atteignent le thalamus (les *noyaux intralaminaires* et les *noyaux ventro-postero-latéraux-VPL*), en traversant le bulbe, le pont et le mésencéphale sans y faire relais, avant de se projeter sur les *cortex somesthésiques primaire (SI)* et *secondaire (SII)*. En revanche, la voie lemniscale, composée des cordons dorsaux et du lemnisque médian, transmet rapidement (30 à 110 m/s) et précisément (au niveau temporel et topographique) les informations relevant de la sensibilité tactile fine et des mouvements. Cette dernière voie passe ipsilatéralement par le bulbe où elle croise le plan médian avant de monter dans le tronc cérébral, du côté opposé, pour rejoindre les noyaux *VPL* du thalamus. Elle atteint enfin principalement les aires *SI* et *SII*, mais aussi des aires associatives du *cortex pariétal postérieur (CPP)* et le cortex moteur. Le cortex somesthésique primaire est composé de quatre aires différentes, les aires de Brodmann 3a, 3b, 1 et 2 (Figure 2). L'organisation anatomo-fonctionnelle du cortex somesthésique primaire humain est somatotopique (respect de la disposition spatiale des récepteurs) et semble se caractériser par une représentation

complète de l'hémicorps controlatéral (*homunculus sensoriel*) pour chacune des aires. Les neurones de SII ont des champs récepteurs plus larges et plus complexes que ceux de SI et répondent aux stimulations controlatérales et ipsilatérales. La région SII serait divisée en quatre aires, l'*opercule pariétal 1* (OP1), OP2, OP3 et OP4 également organisées somatotopiquement mais de manière moins détaillée que dans SI. Enfin, Le cortex pariétal postérieur regroupe le *lobule pariétal supérieur* (LPS) et le *lobule pariétal inférieur* (LPI), tous deux séparés par le *sillon intrapariétal* (IPS). Il faut noter que le traitement de l'information serait sériel au sein des différentes aires de SI, SII et même du CPP.

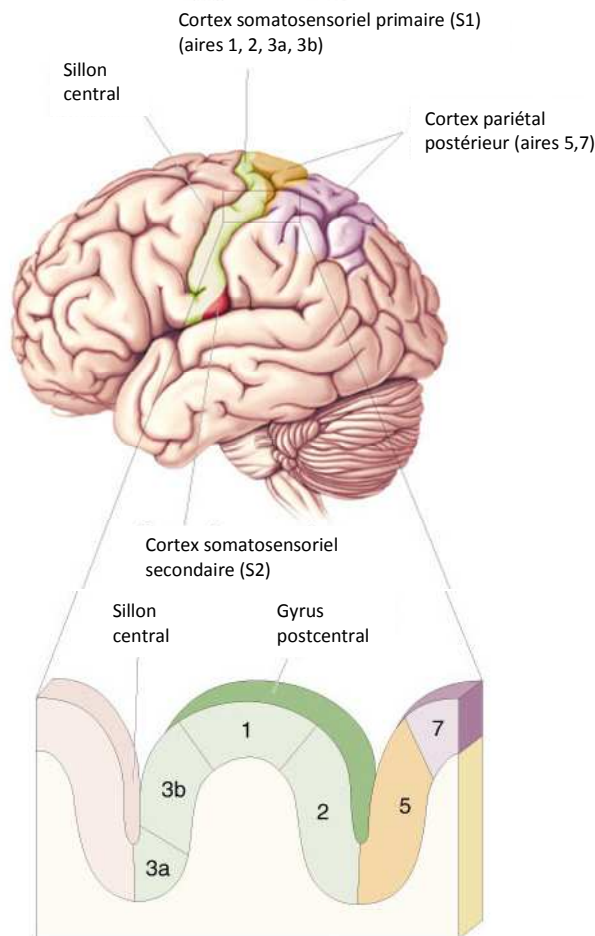


Figure 2. Schématisation du cortex somatosensoriel. Dans la partie inférieure sont représentés les découpages des cortex somesthésique primaire et pariétal postérieur [Repris de Bear, Connors, & Paradiso, 2001]

Au niveau cortical il existerait, comme en vision, une dissociation des voies de la perception et de l'action au sein du système somatosensoriel (Dijkerman & de Haan, 2007; Goodale, Milner, Jakobson, & Carey, 1991). La reconnaissance haptique d'objets nécessiterait une collaboration étroite entre les voies ventrale de la perception et dorsale de l'action. La voie dorsale participerait à la programmation des mouvements d'exploration spécifiques aux propriétés de l'objet ainsi qu'à l'intégration spatio-temporelle des différentes

informations extraites (Dijkerman & De Haan, 2007). Toutefois, il faut noter que l'altération de la reconnaissance tactile d'objets n'est pas systématiquement corrélée avec un déficit de l'exploration tactile (Reed & Caselli, 1994). De même, une altération de la capacité à générer des mouvements d'exploration peut être observée alors que la perception tactile est relativement préservée (Valenza et al., 2001).

Le toucher passif et actif

Il existe une grande différence de percept final lorsque la personne qui perçoit l'objet est passivement stimulée (i.e. touchée par un objet) ou est responsable de mouvements d'exploration. Dans une situation de *toucher passif*, la personne obtient uniquement des sensations en lien avec les déformations cutanées issues du contact entre l'objet et le segment corporel concerné, et ceci y compris lorsque l'objet est en mouvement. Quand la personne est activement impliquée dans l'exploration, les sensations cutanées sont alors induites par les variations de l'activité motrice propre et donc intimement liées aux informations kinesthésiques. Ainsi, le *toucher actif* serait plutôt à considérer comme un sens exploratoire plutôt qu'un simple sens réceptif. Cette distinction, développée par Gibson (1962), entre perception active et passive peut différer selon les champs de recherche. Par exemple, dans le cadre de l'acquisition de compétences motrices, telles qu'apprendre à former des lettres de l'alphabet, il est supposé que l'apprenant produira plus rapidement et plus justement les lettres si le professeur guide son bras pendant la réalisation de l'acte moteur. Dans le cas d'un mouvement guidé, la personne n'initie et ne contrôle pas elle-même son action et peut à ce titre être considérée comme passive. Toutefois, cette condition passive diffère de celle proposée par Gibson (1962) dans laquelle des emporte-pièces de formes différentes (e.g., triangle, étoile...) étaient appliqués de manière statique ou en rotation sur la paume de la main. Nous nous devons donc de préciser la terminologie qui sera utilisée dans ce travail. Nous utiliserons le terme de *toucher passif* (le terme *toucher cutané* est également régulièrement trouvé dans la littérature) pour parler de stimulations mécaniques de la peau et des tissus sous-jacents en dehors de toute mobilisation de muscles, tendons et articulations. Nous parlerons d'*exploration haptique active* (qui peut être également trouvée sous la dénomination de *toucher actif*) lorsque des mouvements d'exploration seront produits par le participant lui-même et de *guidage haptique* lorsque les mouvements d'exploration seront passifs, c'est-à-dire guidés (e.g., par un autre individu ou un dispositif haptique) ou semi-passifs, lorsque le mouvement est initié par l'individu mais contraint par un dispositif. La différence entre une exploration haptique active et le guidage haptique résiderait dans le fait

que lorsque des mouvements volontaires d'exploration sont effectués, s'ajouteraient aux informations tactilo-kinesthésiques, des informations non sensorielles issues des commandes motrices générant les mouvements d'exploration : les *décharges corollaires* ou *copies d'efférences* (Helmholtz, cité par Wolpert & Flanagan, 2001). Les processus par lesquels ces décharges participent à la perception font encore l'objet de débats. Cependant, quel que soit le type d'exploration haptique, les informations cutanées et kinesthésiques sont difficiles à séparer précisément et sont rarement considérées indépendamment. Plus encore, la perception des propriétés d'un objet et de son unité découle de leur covariation. Ainsi, le système haptique, et plus particulièrement l'exploration haptique active, est souvent considérée comme le modèle de référence du lien entre la perception et l'action. Ce couplage perception-action est tel que De Vignemont, Ehrsson et Haggard (2005) ont montré qu'une vibration des tendons du biceps qui induit une illusion d'extension de l'épaule et une sensation subséquente d'élongation de l'index biaise la perception de la longueur (perçue comme étant plus importante) d'un objet exploré du bout du doigt. D'après les auteurs, la perception interne du corps, ou de la partie du corps en contact avec l'objet, influence directement la perception externe de l'objet.

Comme nous venons de le voir, la perception qui découle de l'exploration haptique active est donc composée d'une dimension intéroceptive et extéroceptive. Cependant, il faut noter qu'il n'y a pas de correspondance stricte entre ces deux dimensions et les sensations tactiles et kinesthésiques issues de l'exploration haptique, et ce, bien que classiquement les récepteurs tactiles soient considérés comme impliqués dans la perception des caractéristiques des objets (e.g., forme, rugosité, etc.) et le système kinesthésique dédié à la perception du mouvement et de la position du corps. La perception haptique, qui découle de l'exploration et de la manipulation d'objets, pose alors le problème de l'intégration sensorimotrice, puisqu'elle nécessite l'intégration d'une variété importante de signaux sensoriels et moteurs dans le temps et dans l'espace.

Les procédures exploratoires manuelles

L'exploration haptique peut être considérée comme une recherche de stimulations, ou plus précisément comme une stratégie d'obtention des stimulations nécessaires pour aboutir à l'identification de ce qui est touché. Lorsqu'une personne joue un rôle actif dans l'exploration haptique d'un objet, son attention serait dirigée vers les propriétés de l'objet. Dans cette optique, l'exploration haptique active peut alors être analysée à partir d'éléments directement observables, comme le type de mouvements d'exploration utilisés et les perceptions qui en

découlent. En effet, la variété des patterns sensoriels issus des différents mouvements de la main pendant la manipulation d'un objet nous renseigne sur ses propriétés. Lederman et Klatzky (1993) ont classé les propriétés des objets pouvant être extraites par le système haptique en deux catégories : la dimension matérielle (propriétés de texture, dureté et température apparente) indépendante du type d'objet exploré et la dimension géométrique (propriétés de taille et forme) spécifique pour un objet particulier. Le poids serait une dimension hybride reflétant la densité et le volume de l'objet. Lederman et Klatzky (1987) ont également mis en évidence des patterns d'exploration manuelle très systématiques, appelés *procédures exploratoires*, associés au recueil de propriétés particulières des objets (Figure 3). Elles ont demandé à des adultes (yeux bandés) de trouver parmi trois objets, explorés haptiquement, celui qui correspondait à un objet de référence préalablement exploré. L'appariement des deux objets devait se faire sur une propriété particulière, comme la texture, la forme, le poids, etc., en ignorant les autres propriétés. L'étude des enregistrements vidéo a permis de montrer qu'un individu qui explore activement et librement un objet choisira, parmi tous les mouvements manuels possibles, ceux qui sont les plus appropriés pour recueillir l'information pertinente sur la propriété de l'objet qui l'intéresse. Par exemple, lorsque les participants veulent connaître la forme globale, le volume d'un objet, ils l'enveloppent, c'est-à-dire qu'ils adaptent la conformation de leur main à la surface de l'objet sans exercer de forces trop importantes ; lorsqu'ils veulent percevoir la forme précise d'un objet, ils suivent les contours, c'est-à-dire qu'ils utilisent le bout d'un ou plusieurs doigts pour suivre les variations de la surface ou les bords de l'objet.

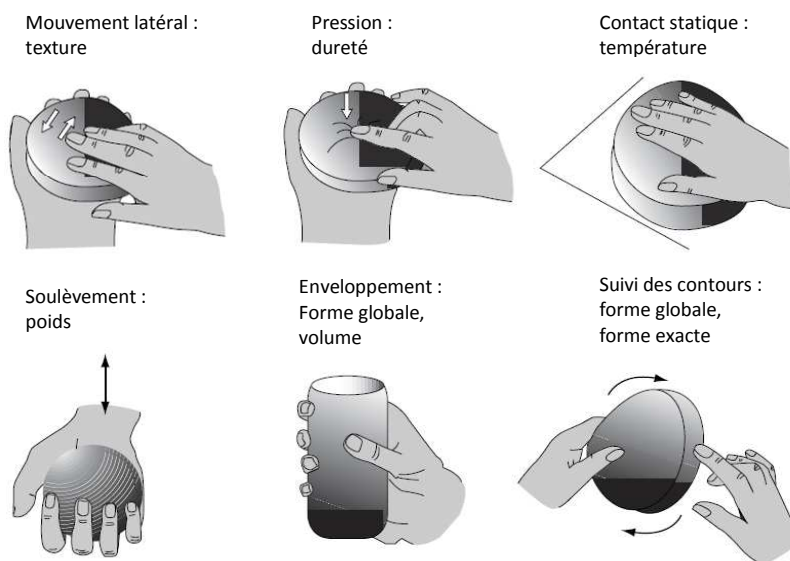


Figure 3. Schématisation des six « procédures exploratoires » manuelles et des propriétés des objets qui leur sont associées. [adapté de Lederman et Klatzky, 1987]

La reconnaissance d'un l'objet implique le traitement de ses différentes dimensions matérielle et géométrique, c'est-à-dire le traitement d'un certain nombre de propriétés (texture, orientation, taille, forme, etc.) et l'accès à leurs valeurs représentatives (e.g., rond, carré ou triangle pour la propriété de forme). Chaque modalité excelle dans le traitement de certaines propriétés et est moins performante dans d'autres. Lederman et Klatzky (1997) ont montré qu'en raison de son mode d'exploration, le toucher n'est pas spécialisé dans la perception spatiale, domaine d'excellence de la vision, mais plutôt dans les propriétés matérielles. Cette spécialisation s'explique sans doute par la simplicité des procédures exploratoires optimales pour percevoir des propriétés matérielles, alors que celles propres aux propriétés géométriques exigent des mouvements coordonnés dans le temps et l'espace. Lederman et Klatzky (1993) ont notamment observé une stratégie d'exploration en deux temps pour percevoir la forme des objets ; les adultes commencent par « l'enveloppement », mobilisant toute la main et apportant des informations sur la forme globale, puis passent au « suivi des contours », procédure plus spécifique pour percevoir précisément la forme. De plus, les propriétés matérielles de texture et dureté seraient traitées très tôt et sans mobilisation attentionnelle alors que les propriétés spatiales nécessitent un investissement attentionnel et seraient d'un accès tardif au cours du processus perceptif (Lederman & Klatzky, 1997). Malgré cette spécialisation, le système haptique est la modalité sensorielle qui permet de percevoir le plus de propriétés physiques des objets en comparaison avec les autres sens. La forme est une des caractéristiques typique disponible pour identifier les objets de notre environnement. Nous allons particulièrement nous intéresser à la reconnaissance de la forme des objets, caractéristique spatiale accessible à la fois par le système visuel et le système haptique.

1.1.2.2. La reconnaissance des formes tridimensionnelles

Un certain nombre de travaux s'est intéressé à la capacité de reconnaissance des objets par le toucher chez des individus travaillant sans voir. Heller et Myers (1983) ont confirmé les résultats de Gibson (1962) en montrant que le toucher actif assure une meilleure reconnaissance des formes que le toucher passif, que les formes soient appliquées de manière statique ou dynamique sur la paume de la main. Cependant, lorsque le temps d'application des formes sur la pulpe de l'index immobile passe de 5 à 30 secondes, Heller (1984) note des performances en reconnaissance équivalentes à celles obtenues lors d'une exploration active de seulement 5 secondes. Ainsi, le toucher passif pourrait se hisser à la hauteur du toucher actif dans les cas où l'on disposerait d'un temps d'interaction plus important avec les objets.

Toutefois, appliquer des forces latérales sur un doigt immobile, génère une perception ambiguë des formes. En effet, une forme concave qui se déplace vers la droite exerce les mêmes forces latérales, sur un doigt stationnaire, qu'une forme convexe qui se déplace vers la gauche (Robles-De-La-Torre, 2002). Pour percevoir correctement la forme, la personne doit connaître le sens de déplacement de l'objet ou être elle-même responsable des mouvements d'exploration (Robles-De-La-Torre, 2002; Smith, Chapman, Donati, Fortier-Poisson, & Hayward, 2009). Dans ce sens, Klatzky, Lederman et Metzger (1985) ont montré que des personnes libres de leurs mouvements d'exploration sont très compétentes pour reconnaître des objets communs avec le toucher. Dans leur étude, des adultes étaient capables de donner le nom exact de 94% des 100 objets familiers présentés (e.g., marteau, carotte, stylo...) en un temps inférieur à 5 secondes.

Bigelow (1981) montre que des enfants de 2ans ½ et 5 ans possèdent également de bonnes capacités d'identification d'objets communs (cuillère, stylo, clé...) même si les enfants de 5 ans se révèlent plus performants. De nombreux auteurs observent d'importants changements avec l'âge dans les procédures exploratoires utilisées par les enfants pour percevoir les objets (Abravanel, 1968; Hatwell, Osiek, & Jeanneret, 1973; Piaget & Inhelder, 1947/1956). Les jeunes enfants produiraient peu de mouvements, dont la plupart seraient partiels et peu organisés ; ils accèderaient de façon très séquentielle (voire n'accèderaient pas du tout) à certaines propriétés des objets. Les objets ne seraient donc pas totalement traités par les plus jeunes enfants. Selon les recherches, une exploration haptique plus systématique et organisée émergerait entre 5 et 7 ans. Les enfants, à l'image des adultes pourraient alors reconstruire l'objet entier (dernière étape du traitement perceptif) en intégrant et combinant l'ensemble des propriétés perçues (Berger & Hatwell, 1995). Dans la recherche de Bigelow (1981), il apparaît également que les taux de reconnaissance diffèrent selon le type d'objets explorés. Des objets communs miniaturisés de grand taille (e.g., lit, table de poupée) et de petite taille (e.g., brosse, biberon de poupée) sont moins bien reconnus que ces mêmes objets non-miniaturisés, particulièrement par les enfants les plus jeunes. D'après Bigelow, c'est la plus grande expérience des enfants plus âgés, à la fois visuelle et tactile avec les objets, qui expliquerait cette différence. Il est actuellement admis que l'identification d'objets s'effectue par l'extraction de l'information issue du stimulus (traitement ascendant, *bottom-up*) mais aussi à partir des connaissances spécifiques sur les objets, liées au contexte ou à l'expérience antérieure (processus descendants, *top-down*). Les personnes se construiraient des hypothèses sur les objets à partir des informations déjà stockées en mémoire, et centreraient ainsi leur analyse perceptive sur une propriété précise, le plus souvent la forme, afin de vérifier leurs

hypothèses (Lederman & Klatzky, 1990). La forme est la propriété la plus fréquemment citée comme la propriété permettant de différencier les objets. Toutefois, nous allons voir que des attributs structuraux de la propriété de forme (contour, surface) ont une influence sur les capacités de discrimination haptique.

1.1.2.3. La reconnaissance des formes bidimensionnelles

Dans l'étude de la reconnaissance des objets, les chercheurs ont souvent utilisé des *images picturales* (représentations graphiques en relief des objets), initialement proposées comme aide auprès de personnes aveugles. Ces stimuli sont une projection du monde tridimensionnel dans un espace en deux dimensions et consistent, la plupart du temps, en des dessins dont les contours sont embossés. Pour ce type de stimuli, un certain nombre de propriétés accessibles au système haptique, tel que le poids, la dureté, la température est absent ou minimisé. Il est admis que l'identification de contours en relief est particulièrement difficile et coûteuse en temps. Selon les recherches, les taux de reconnaissances correctes sont très variables et restent bien inférieurs à la reconnaissance des objets en trois dimensions (30 à 40% en moyenne) (De Vignemont, et al., 2005; Kennedy & Bai, 2002; Klatzky, Loomis, Lederman, Wake, & Fujita, 1993; Lederman, Klatzky, Chataway, & Summers, 1990; Loomis, Klatzky, & Lederman, 1991; Magee & Kennedy, 1980; Thompson, Chronicle, & Collins, 2003). Le problème de l'identification de ce type de patterns a été étudié sous divers angles. Nous aborderons successivement les effets des processus d'exploration puis la manière dont les informations extraites sont traitées et interprétées.

Effet du type d'exploration

Magee et Kennedy (1980) se sont intéressés à l'effet du type d'exploration sur l'identification des contours en relief chez les aveugles précoces et congénitaux. Ils ont montré que guider la main du participant le long du pattern lui permettait d'identifier davantage de dessins par rapport à une exploration haptique active. D'autres auteurs rapportent également la supériorité du guidage haptique dans l'identification de contours en relief (D'Angiulli, Kennedy, & Heller, 1998). Ce résultat a été attribué au fait que le participant n'aurait pas besoin, lorsqu'il est guidé, de planifier les mouvements d'exploration à venir et serait davantage focalisé sur la reconnaissance de la forme (Magee & Kennedy, 1980). En d'autres termes, l'exploration active des contours peut être considérée comme une double tâche où le contrôle des mouvements d'exploration interfère avec le processus de reconnaissance. Dans le même ordre d'idée, Thompson et ses collaborateurs (2003) ont trouvé

que des dessins totalement en relief sont mieux identifiés que des dessins dont seuls les contours sont saillants. Proposer une surface en relief, plutôt qu'une simple ligne, serait plus efficace pour guider les doigts le long du dessin et ainsi dégager partiellement le participant de la charge de l'exploration. Cependant, comme le notent Lederman et Klatzky (1993) ou Symmons et Richardson (2000) la majorité des personnes déclaraient ne pas avoir le sentiment de prendre de décisions conscientes quant à la manière d'explorer un stimulus. De plus, Symmons (2004) a montré que le guidage haptique est plus efficace pour identifier les contours en relief de lettres capitales ou de formes simples (constituées de peu de lignes, peu ou pas d'intersections, comme un sapin, une fourchette), mais que l'exploration active devient aussi efficace lorsque les participants ont à faire à des formes abstraites plus complexes (possédant diverses intersections de lignes, angles ou encore des espaces entre les éléments constitutifs de la forme). Dans la recherche de Symmons et Richardson (2000), les personnes rapportent se « construire une image dans la tête » au cours de l'exploration pour identifier les dessins explorés. La stratégie pour résoudre la tâche consisterait alors à maintenir le maximum d'informations recueillies séquentiellement (chaque nouvelle information doit être encodée et intégrée aux autres) afin de se construire une « image mentale », puis d'y associer le nom de l'objet. C'est pourquoi, il est supposé que la différence de performances entre une exploration active ou passive de dessins en relief serait davantage le reflet d'une charge cognitive plus ou moins importante que le coût de l'exploration et de son contrôle.

L'ensemble des résultats et hypothèses évoqués jusqu'à présent nous encourage à envisager la supériorité du guidage haptique pour l'identification de contours en reliefs. Toutefois, les différentes tâches proposées (identification ou appariement de formes), les méthodologies variées employées pour guider l'exploration (guidage humain ou via un dispositif haptique) ou encore les diverses consignes données pour encadrer l'exploration active (retours en arrière autorisés ou non) rendent complexe l'interprétation des différences entre exploration haptique active et guidée.

Par ailleurs, quelque soit le type d'exploration, la perception haptique est caractérisée par la nature séquentielle de son exploration. L'acquisition sérielle de l'information explique la lenteur de l'identification et pourrait également être à l'origine du faible taux d'identification de dessins en relief. Dans ce sens, Loomis et ses collaborateurs (1991) ont montré, en comparant la reconnaissance visuelle et haptique de dessins en relief, que les taux de reconnaissance sont plus faibles lorsque l'information est recueillie séquentiellement plutôt qu'en parallèle, et ceci, quelle que soit la modalité considérée. Dans la condition visuelle, des

portions de l'image étaient visibles à travers une fenêtre statique qui réduisait la dimension du champ visuel à celle fournie en condition tactile (un ou deux doigts).

En résumé, dans la plupart des tâches impliquant des stimuli en deux dimensions, relativement peu d'indices sont disponibles pour le système haptique comparativement aux indices habituellement disponibles (e.g., texture, dureté). Seules des informations de contours, devant être recueillies, maintenues et intégrées séquentiellement, participent à la construction du percept final. Les personnes pourraient alors souffrir d'un manque de capacités perceptives et/ou cognitives qui entrave l'identification haptique de dessins en relief.

Effet de l'expérience visuelle

Certains chercheurs, après s'être intéressés à l'exploration et au recueil des informations par le système haptique, ont tenté de comprendre comment se réalise l'interprétation des dessins dont les contours sont en relief. La principale question a été de déterminer si une expérience visuelle était nécessaire à leur bonne interprétation. Cette problématique a souvent été abordée à travers la comparaison des performances de personnes aveugles congénitales (sans expérience visuelle), aveugles tardives (expérience visuelle faible) et de personnes voyantes travaillant momentanément sous occlusion visuelle (expérience visuelle importante). Les résultats de ces études sur la dénomination de dessins tactiles sont contradictoires. D'une part, il a été montré que les aveugles tardifs obtenaient de meilleures performances que les personnes aveugles congénitales et que les personnes voyantes contrôles, qui ne différaient pas entre elles (Heller, 1989). Ce résultat a été interprété dans le sens d'un double avantage des participants aveugles tardifs. En effet, ils possèdent à la fois des compétences haptique importantes et une expérience visuelle antérieure des représentations graphiques. Les personnes aveugles congénitales seraient désavantagées par leur manque de connaissances des représentations en deux dimensions et des règles qui régissent l'espace projectif (comme la perspective). Toutefois, les auteurs ne peuvent affirmer que l'expérience visuelle est une condition nécessaire à la réussite puisque les performances des participants voyants contrôles équivalent celles des participants aveugles congénitaux. D'autre part, Lederman et ses collègues (1990) ont trouvé que les aveugles congénitaux identifiaient moins de dessins d'objets familiers en relief que les participants voyants avec les yeux bandés. Dans cette étude, les chercheurs notent également l'existence d'une forte corrélation négative entre les temps d'identification des images et leurs scores « d'imageabilité » (préalablement attribués aux images). Les auteurs concluent ainsi qu'il existerait une médiation par l'imagerie visuelle chez les personnes voyantes.

Au début des années 90, ont émergé, de ces résultats contradictoires, deux théories. La première théorie, énoncée par Lederman et ses collaborateurs (1990), propose que la personne, confrontée à des contours en relief, extrait et intègre le maximum d'informations puis transpose la représentation haptique résultante en une image visuelle afin de l'identifier via les *processeurs visuels* (Figure 4). Selon cette théorie, la différence dans les performances d'identification provient des différences de capacités d'imagerie visuelle des personnes, qui seraient en lien avec ce qu'elles connaissent de l'espace projectif des objets en trois dimensions.

Dans la seconde théorie proposée par Kennedy (1993) (repris par D'Angiulli, et al., 1998; J.M. Kennedy & Bai, 2002), l'expérience visuelle ne serait pas nécessaire pour interpréter les images représentées en relief. Certaines règles clés de la représentation graphique, comme les changements de points de vue (Heller & Kennedy, 1990), le masquage et la figuration des contours de l'objet plutôt que de ses surfaces, seraient spontanément appliquées dans les productions picturales de certains aveugles (Kennedy, 1993). D'après Kennedy (1993) « *les compétences qu'ils démontrent sont le produit de la compréhension qu'il possèdent des lignes et des principes spatiaux généraux qui émergent lors de la constitution des systèmes perceptifs et de l'appréciation générale de l'espace environnant accessible aux différents sens* » (p.126). Dans cette théorie, les percepts obtenus par la vision ou le toucher seraient similaires et les personnes pourraient identifier les dessins de la même manière à partir d'une représentation haptique ou visuelle de la forme. Les différences de performances d'identification entre aveugles et voyants seraient plutôt liées au niveau de maîtrise des processus exploratoires.

Cependant, les observations effectuées par Kennedy (1993) semblent relever de cas individuels, la production de dessins restant difficile pour la majorité des aveugles (Hatwell, 2003). De plus, dès que le dessin atteint une certaine complexité, des difficultés apparaissent. Heller, Kennedy, et Joyner (1995) ont trouvé que les aveugles précoces sont nettement moins performants que les aveugles tardifs et les voyants travaillant sans voir, dans une tâche où il faut indiquer à quelle place doit se trouver un observateur pour avoir un certain point de vue sur une maison dessinée (vue de haut, de 3/4 ou de côté).

Wijntjes, Lienen, Verstijnen et Kappers (2008), suite à une observation faite par Ikeda et Uchikawa (1978), remettent en question l'hypothèse d'une représentation amodale de Kennedy (1993) et l'hypothèse d'une médiation par l'imagerie visuelle de Lederman *et al.* (1990). Ikeda et Uchikawa (1978) ont rapporté un cas dans lequel un participant qui n'avait

pas identifié, après cinq minutes d'exploration haptique seule, un dessin en relief, était capable de le faire après coup, après avoir dessiné, yeux ouverts, l'image sur papier. « *L'externalisation* » des images mentales semble être un processus qui peut être utilisé afin de restructurer des entrées initialement ininterprétables (Finks, Pinker, & Farah, 1989). Dans le cas de dessins en relief, la description interne sérielle du stimulus peut être utilisée pour croquer un dessin reconnaissable. Par le dessin, il est possible de transformer la description sérielle en une description simultanée plus facile à identifier. Par conséquent, Wijntjers et ses collègues (2008) suggèrent que la difficulté de percevoir haptiquement les contours en relief n'est pas due à un accès privilégié du système visuel à l'identification d'objets mais plutôt à la perception sérielle inhérente au système haptique.

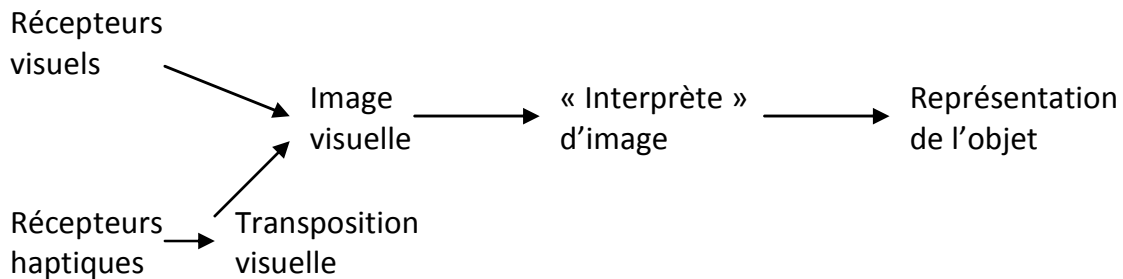


Figure 4. modèle par médiation visuelle du traitement de l'information haptique [adapté de Lederman et al., 1990].

La variable temporelle est une des principales différences de fonctionnement entre le système visuel et le système haptique qui pourrait expliquer que le système haptique ne soit pas considéré comme la modalité la plus efficace pour le traitement des objets, notamment pour les stimuli en deux dimensions. La nature des propriétés traitées est également différente entre les modalités sensorielles. Le système haptique privilégie les propriétés matérielles, alors que le système visuel fait davantage appel aux propriétés géométriques des objets. Nous allons maintenant considérer le processus de reconnaissance des objets par la modalité visuelle.

1.1.3. La reconnaissance des objets par le système visuel

Notre expérience quotidienne témoigne de l'impressionnante capacité de notre système visuel à reconnaître rapidement et précisément les objets³. La compréhension de cette capacité a donné lieu à plusieurs types de modélisations que nous allons décrire plus loin et qui, nous le verrons, font encore l'objet de nombreux débats.

Un objet peut être reconnu visuellement sur la base de sa forme, de sa couleur, sa texture, son mouvement ou encore à partir de sa position relative par rapport à d'autres objets. Cependant, la plupart des objets peuvent être reconnus de manière isolée et pour beaucoup, la couleur, la texture ou le mouvement ne jouent qu'un rôle secondaire. Ainsi, la forme est l'élément le plus spécifique et le plus souvent utilisé. Les principales difficultés pour reconnaître un objet à partir de sa forme sont dues au fait qu'il est possible de représenter un même objet sous différents angles et que ces différentes vues peuvent être très différentes. L'image d'un objet dépend, en effet, de plusieurs facteurs, comme le point de vue de l'observateur, les conditions d'éclairage, etc. Pourtant, un observateur est capable de reconnaître différentes vues d'un même objet malgré les nombreuses différences que présentent les deux silhouettes et malgré les modifications des caractéristiques locales (i.e., angles, longueurs et courbures des lignes...). Un débat existe concernant la nature de la représentation de l'objet dans le cortex visuel humain (Encart 1). Pour certains chercheurs, la représentation des objets est holistique, alors que pour d'autres, elle est basée sur les parties de l'objet.

³ Nous nous intéresserons à l'étude de la reconnaissance d'objets particuliers et n'aborderons pas les modèles qui s'intéressent à la reconnaissance des scènes complexes (Marendaz, Rousset, & Charnallet, 2003).

Encart 1 - De la rétine aux aires cérébrales visuelles

Lorsqu'une personne regarde un objet, la lumière émise ou réfléchie pénètre dans l'œil pour être détectée par la rétine. La rétine possède une organisation laminaire et présente dans sa couche la plus profonde, par rapport à l'arrivée de la lumière, des photorécepteurs. L'arrivée de la lumière au niveau de la rétine et de ses photorécepteurs entraîne un phénomène de transduction visuelle, transformant l'énergie lumineuse en messages nerveux. L'activité électrique va se propager jusqu'aux cellules ganglionnaires (M et P) qui constituent la dernière couche nerveuse de la rétine, « l'étage de sortie » vers les centres de traitements corticaux. A la sortie de la rétine, les axones des cellules ganglionnaires convergent pour former le nerf optique. La grande majorité des fibres du nerf optique (90%) se projette sur le *corps genouillé latéral* (CGL) et 10% environ des fibres se dirigent vers le *colliculus supérieur* (CS). Les axones des différents types de cellules ganglionnaires vont principalement se projeter sur les couches parvocellulaire (P), magnocellulaire (M) du CGL ; ce qui donne naissance à deux voies de traitement parallèles des informations visuelles élémentaires. Les cellules P concernent les hautes fréquences spatiales (informations spatiales fines) et présentent une réponse temporelle de basse fréquence, alors que les cellules M concernent les basses fréquences spatiales (information spatiale grossière) et les hautes fréquences temporelles (Bullier, 1998). Enfin, les cellules P sont caractérisées par leur sensibilité aux variations de couleurs alors que les cellules M sont caractérisées par leur sensibilité aux contrastes et aux mouvements. Les axones du CGL se projettent principalement dans le cortex visuel primaire (V1 ou cortex strié ou aire 17 de Brodmann). Les voies magno- et parvocellulaire se projetant dans des couches distinctes de V1, la séparation de l'information en provenance de ces deux voies est donc conservée.

Il existe donc deux voies visuelles corticales aux propriétés fonctionnelles distinctes en étroite relation avec les caractéristiques fonctionnelles des voies sous-corticales magnocellulaire et parvocellulaire. La *voie dorsale*, du « où » (*where*), se projette sur le *cortex pariétal postérieur* et est spécialisée dans l'analyse des relations spatiales entre les objets et les mouvements visuo-guidés. La *voie ventrale*, du « quoi » (*What*), se projette sur le *cortex inférotemporal* et est spécialisée dans la reconnaissance des objets. Toutefois, la voie privilégiée dans le traitement de la forme des objets dépendrait surtout de la tâche à réaliser par la personne. Selon l'hypothèse d'une dichotomie « perception-action », lorsqu'il s'agit de reconnaître des objets, la voie ventrale serait impliquée, et lorsqu'il s'agit plutôt d'utiliser les informations concernant les objets pour les saisir et les manipuler, c'est la voie dorsale qui serait impliquée (Goodale, et al., 1991).

Il existe également une hiérarchie corticale du traitement de l'information visuelle qui débute dans V1 pour impliquer par la suite les aires extrastriées V2, V3, V4 et V5 de plus en plus spécialisées ; on observe une augmentation de la taille des champs récepteurs et les cellules deviennent sensibles à des stimuli de complexités croissantes. Les aires visuelles de bas-niveaux ne répondraient qu'aux stimulations visuelles alors que les aires de plus haut niveaux pourraient répondre à des stimulations d'autres modalités sensorielles comme l'audition ou le toucher (Calvert, 2001).

1.1.3.1 Les modèles *template-matching*

Dans les modèles *template-matching* la reconnaissance de l'objet se ferait en comparant l'image d'entrée à une représentation spécifique (modèle) de l'objet stockée en mémoire. Afin que la reconnaissance puisse être indépendante du point de vue, la plupart des modèles proposent qu'il existe en mémoire quelques exemplaires représentatifs des différentes vues d'un même objet (Ullman, 1989, 1998). Les représentations d'un objet en mémoire, dérivées de l'apparence des objets au moment où ils sont rencontrés, dépendraient

d'un point de vue particulier, déterminé par la position de l'observateur. Reconnaître un objet consisterait alors à apparier la forme perçue à l'exemplaire en mémoire qui s'approche le plus de la forme, avec une marge d'erreur minimale. Dans le *modèle d'alignement* d'Ullman, le degré d'appariement dépend du nombre de points d'alignements relevés entre la forme et le modèle. Toutefois, si l'orientation ou la taille de la forme sont très éloignées de la représentation en mémoire, un processus de *normalisation* doit se mettre en place. Ce processus, qui peut consister en une « rotation mentale », « translation mentale » ou encore un « zoom mental », a pour but d'optimiser l'ajustement au modèle de l'objet, stocké en mémoire. Dans le cas d'une normalisation, il est nécessaire d'envisager des processus descendants (*top-down*) qui guideraient les transformations à opérer pour un tel ajustement, à partir de la représentation en mémoire. Par ailleurs, dans le cas où un processus de normalisation est nécessaire à la reconnaissance, les modèles d'ajustement prédisent une augmentation du temps d'identification qui dépendrait de l'éloignement entre l'objet à identifier et la représentation en mémoire. Des données expérimentales vont dans ce sens, notamment lors de la rotation de l'image ou lors de la présentation de l'objet sous un nouveau point de vue (Edelman & Bulthoff, 1992; Tarr & Pinker, 1989).

1.1.3.2 Les modèles de reconnaissance par composantes structurales

D'autres résultats, au contraire, ne montrent pas d'allongement du temps d'identification suite à des modifications de taille, d'orientation ou de localisation spatiale de l'objet (Biederman, 1987; Biederman & Gerhardstein, 1993). Ces derniers résultats amènent à penser que la représentation des objets en mémoire est directement invariante du point de vue. Le postulat de base des modèles de reconnaissance par composantes (*RBC* en anglais pour *recognition-by-components*) est qu'au cours du traitement perceptif, la forme des objets est décomposée en primitives, ou composantes de base (Biederman, 1987; Marr & Nishihara, 1978). Chaque objet consiste en un arrangement spatial particulier de ces primitives (communes à tous les objets) et cette description structurale serait invariante du point de vue de l'observateur.

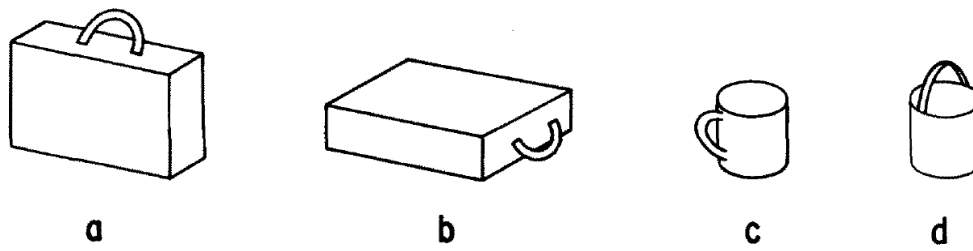


Figure 5. Différents arrangements des mêmes composants peuvent produire différents objets [repris de Biederman, 1987]

Dans le premier modèle proposé par Marr et Nishihara (1978), la reconnaissance des objets consiste en une suite de processus permettant de construire successivement des représentations de plus en plus précises et complexes. C'est à la dernière étape du traitement que la représentation de l'objet (*représentation 3D*) devient invariante du point de vue de l'observateur. La reconnaissance a lieu dès que cette représentation 3D est appariée à la description structurale de l'objet stockée en mémoire. Biederman (1987) a par la suite proposé qu'un modeste jeu de composants géométriques simples, comme des cubes, cylindres et cônes, appelés *géons* (contraction de l'anglais *geometrical icons*), est extrait à partir des propriétés des contours des objets 2D. Chaque objet possède donc une *description structurale de geons (GSDs)* particulière. Biederman estime que seulement 36 géons différents et leurs arrangements peuvent produire des millions d'objets (Figure 5). Afin d'identifier un objet que l'on observe, deux ou trois géons, et leurs relations spécifiques, sont nécessaires au minimum pour faire correspondre la forme à la description structurale que nous avons de cet objet en mémoire. L'identification des objets est généralement invariante du point de vue (modifications d'orientation, de taille...) et de la qualité de l'image pour autant que tous les géons qui le composent restent visibles et que leur arrangement spatial ne soit pas modifié, autrement dit que les GSDs correspondent (Figure 6). Ainsi, dans le cadre des modèles RBC, un observateur est capable de reconnaître, sans coût supplémentaire, un objet ayant subi une rotation ou étant présenté sous un nouvel angle de vue. Malgré le respect de toutes ces conditions, il existerait une difficulté de ces modèles à expliquer le phénomène de catégorisation ; des objets appartenant à une même catégorie (e.g., maison, voiture, visage...) seraient encodés comme des représentations distinctes (Tarr & Bülthoff, 1995).

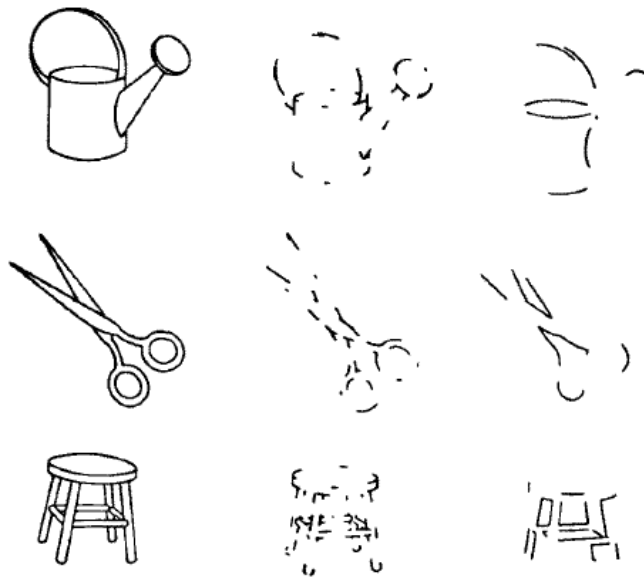


Figure 6. Trois exemples d'objets utilisés dans l'expérience de perception d'objets dégradés de Biederman. Dans la colonne de gauche sont représentées les versions originales intactes des objets. Dans la colonne du milieu, les versions reconnaissables. Les parties supprimées des contours peuvent être remplacées en utilisant le principe de colinéarité et de légères courbures. Dans la colonne de droite, les versions non reconnaissables sont figurées. Les contours ont été supprimés au niveau des courbures de l'objet. De plus, les sommets ont été modifiés, des symétries et parallélismes trompeurs ont été introduits [adapté de Biederman, 1987].

1.1.3.3 Le modèle « time course contingency »

Un troisième type de modèle a été proposé, *le modèle de contingences* (Sanocki, 1993, 1999). L'hypothèse de base est que la reconnaissance des objets est un processus dynamique où les informations les plus précocement traitées contraignent ou modifient l'analyse de l'image. Comme pour les modèles de reconnaissance par composantes, l'objet serait décomposé en composantes principales, mais ce processus ne serait pas simplement utilisé pour détecter les informations distinctives, mais serait un véritable processus de construction dans le temps. Pendant la construction de la représentation structurale des objets, les dernières étapes du traitement peuvent être modifiées par des rétroactions des traitements intervenus plus précocement. Ainsi, l'auteur propose que la structure globale des objets soit utilisée pour guider le traitement des informations locales. Cette hypothèse a été testée à l'aide de paradigmes d'amorçage utilisant des structures globales (les contours de l'objet) ou locales comme amorces (Sanocki, 1993, 1999) (Figure 7). Un effet d'amorçage est obtenu en faveur de la structure globale, celle-ci préactiverait une catégorie d'objets en mémoire qui permettraient ensuite de guider efficacement l'analyse des détails. Cette idée que la reconnaissance visuelle (rapide) suivrait une logique de traitement « *Coarse-to-Fine* » est très répandue dans la reconnaissance visuelle des scènes naturelles. L'information « grossière » issue des basses fréquences spatiales, véhiculée rapidement, permettrait une première reconnaissance que validerait ou non l'information « fine » issue des hautes fréquences spatiales plus tardives (Peyrin et al., 2005; Schyns & Olivia, 1994).

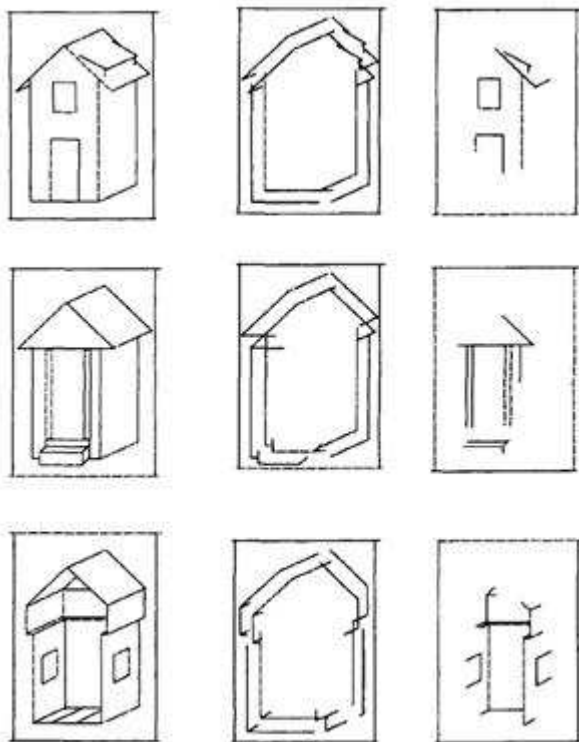


Figure 7. Exemples d'items utilisés dans la tâche d'amorçage de Stanocki. Dans la colonne de gauche sont représentés trois des objets cibles. Dans la colonne du milieu les amorces globales correspondant à chacune des cibles, et dans la colonne de droite les amorces locales [adapté de Stanocki, 1993].

1.1.3.4 L'apport des neurosciences dans la reconnaissance visuelle des objets

La grande majorité des données en neurosciences, sur la voie ventrale du traitement visuel des objets, semble donner raison aux modèles de la reconnaissance des objets par composantes structurales (pour des détails sur les voies visuelles, voir Encart 1). En effet, concernant cette voie, l'idée dominante est qu'à chaque étape seraient traitées et intégrées des informations de plus en plus complexes sur les objets. Lorsque l'information visuelle arrive au niveau cortical, les aires V1 et V2 vont respectivement extraire les traits locaux (Hubel & Wiesel, 1968) et les éléments de contours de l'objet, participant ainsi au traitement de la forme globale. Au-delà de ces aires, pour reconnaître les objets, l'information emprunte la voie ventrale proprement dite et chemine à travers différentes aires cérébrales. Même si son organisation anatomique et fonctionnelle reste en partie inconnue chez l'homme, il semblerait qu'elle comprenne une région qui répond à toutes sortes de stimuli et certaines régions qui

répondent principalement à une classe de stimuli, respectivement, le *complexe latéral occipital* (LOC) et le cortex *occipito-temporal ventral* (VOT)⁴.

Le complexe latéral occipital (LOC)

Le *complexe latéral occipital* (LOC) constitue une large région corticale du cortex occipital latéral et inférieur (pour plus d'informations anatomiques voir Malach et al., 1995). Contrairement aux aires visuelles de bas niveau, le LOC s'active lors de la présentation visuelle d'objets et non lors de la présentation de patrons de texture (qui possèdent certaines caractéristiques géométriques en commun avec les objets) (Malach et al., 1995). De plus son activation est corrélée aux performances de reconnaissance des participants, par exemple lors d'une tâche de dénomination d'objets (Grill-Spector, Kushnir, Hendler, & Malach, 2000). Le LOC jouerait donc un rôle crucial dans la reconnaissance visuelle des objets (pour une revue, voir Grill-Spector, Kourtzi, & Kanwisher, 2001). De plus, l'activation de ce complexe est plus importante quand l'image d'un objet est intacte, c'est-à-dire quand la structure de l'objet est préservée, plutôt que « brouillée », c'est-à-dire lorsqu'elle subit un réarrangement spatial de ses parties (Grill-Spector et al., 2000). Ainsi, le LOC serait impliqué dans la perception visuelle de la forme globale des objets. Le LOC représenterait la forme globale de l'objet sans prendre en compte les différents traits locaux de la forme. Il est davantage activé pour des images d'objets aux contours continus plutôt que pour des images à compléter (Grill-Spector, et al., 2001; Lerner, Hendler, & Malach, 2002). La réponse de cette région aux formes globales ne dépend pas du caractère familier ou non des objets (Lerner et al., 2002), suggérant que le LOC n'est pas influencé par les processus sémantiques (Malach et al., 1995).

Par ailleurs, une adaptation, c'est-à-dire une réduction de l'activation, du LOC pour des stimuli précédemment vus a été notée contrairement au cas où les stimuli sont nouveaux. Ce phénomène d'adaptation refléterait l'apparition d'une sélectivité pour les objets déjà vu (voir Grill-Spector et al, 2006 pour plus de détails sur les modèles neuronaux de l'adaptation). Enfin, l'activation du LOC est invariante aux modifications de taille et de position des objets dans le champ visuel (Grill-Spector et al., 1999) ainsi qu'aux faibles rotations des objets (James, Humphrey, Gati, Menon, & Goodale, 2002).

⁴ Un certain nombre de régions hautement sélectives à certains objets, comme les visages et les lieux a été décrit dans le VOT (pour plus d'informations voir Malach, Levy, & Hasson, 2002). D'après certains auteurs, il existerait également une aire spécialisée dans la perception des lettres et des mots appelée *Visual Word Form Area* (VWFA) (Cohen et al., 2000) que nous aborderons plus tard.

Le LOC est donc impliqué dans une analyse de haut niveau, de l'image des objets, qui concerne leur forme globale, et est indépendante de certains indices, comme la taille et la position du stimulus dans le champ visuel. Cependant, l'invariance par rapport au point de vue ne serait pas encore totalement effectuée au sein de ce complexe. Le LOC ne serait pas non plus impliqué dans la reconnaissance sémantique finale de l'objet, et serait, à ce titre, une région intermédiaire dans le processus de reconnaissance visuelle des objets qui débute par la détection des traits constitutifs de l'image.

Au cours des deux premières parties de ce chapitre, nous avons abordé séparément l'étude de la reconnaissance des objets par les modalités haptique et visuelle. Nous avons vu que si le système perceptif ne dispose que de la modalité haptique, il traite en priorité des propriétés matérielles plus rapidement extractibles que les propriétés géométriques. Lorsque les propriétés matérielles ne sont plus disponibles et que seule la propriété de forme peut être analysée pour reconnaître les objets, alors le traitement est long et coûteux. Nous avons également vu que si le système perceptif ne dispose que de la modalité visuelle, alors le traitement de l'objet est plus court et efficace quelque soit le type de stimuli et le point de vue adopté. Que se passe-t-il maintenant si, comme dans la plupart des situations quotidiennes, nous pouvons accéder aux objets via nos différentes modalités sensorielles simultanément ?

1.2 La reconnaissance multimodale des objets : interactions et intégrations multisensorielles

Dans des conditions naturelles d'observation, les objets sont le plus souvent appréhendés par plusieurs de nos sens simultanément. Dans la majorité des cas, les informations sur les objets auxquelles accèdent les modalités sensorielles sont complémentaires ou redondantes. Pour pouvoir passer d'un ensemble d'informations extraites séparément par nos sens à une perception multisensorielle unifiée et cohérente de l'objet, un « *liage* » (« *binding* ») doit être fait. La question des mécanismes à l'origine d'un liage perceptif n'est pas triviale. Dans la littérature, les études évoquant les interactions⁵ entre différents systèmes sensoriels sont nombreuses et ont mis en évidence de nombreux phénomènes perceptifs (biais, illusions, améliorations, dégradations) (pour une revue, voir

⁵ Les situations où plusieurs modalités sensorielles sont sollicitées et doivent interagir sont appelées interactions multisensorielles ou multimodales.

Hatwell, 1994). Pour autant, peut-on certifier que toutes les situations d'interactions multimodales garantissent une intégration multisensorielle de l'information ? Parmi les protocoles proposés, nous nous intéresserons particulièrement à la présentation multimodale d'informations lors de l'apprentissage. Afin de bénéficier des avantages d'une perception multimodale, nous verrons qu'il existe des facteurs à ne pas négliger. Nous aborderons ensuite les modèles de l'intégration multisensorielle qui proposent d'expliquer la manière dont les différentes entrées sensorielles sont combinées dans le but de construire une représentation robuste et fiable des objets. Enfin, nous nous intéresserons aux bases neurales sous-jacentes de l'intégration, véritables défis pour le système nerveux, qui amèneront un nouvel éclairage à la problématique de l'intégration multisensorielle.

1.2.1 Interactions multimodales

Dans l'étude des interactions multimodales, il a souvent été proposé de fournir des informations divergentes aux modalités sensorielles dans le but de créer des conflits intermodaux. La logique sous-jacente est qu'en cas de conflit, il serait plus évident qu'en condition « normale » de séparer les propriétés des signaux sensoriels et d'étudier leurs combinaisons. Il a été rapporté différents types de réponses aux informations divergentes, dont le plus typique est le « biais sensoriel ». Un biais sensoriel intervient quand la perception d'une information sensorielle est modifiée par la présence d'une autre information. Des auteurs ont montré, par exemple, que la localisation spatiale d'une information visuelle peut être influencée par la localisation d'une source auditive (Bertelson & Radeau, 1981; Radeau & Bertelson, 1987). Dans la majorité des cas, la source sonore est perçue comme étant plus proche de la source visuelle qu'elle ne l'est réellement, c'est *l'effet de ventriloquie*⁶ classique. Toutefois, plus les stimuli sont éloignés dans l'espace, plus ils ont tendance à être traités comme deux événements indépendants (Bertelson & Radeau, 1981).

Dans leur célèbre expérience, McGurk & MacDonald (1976) présentent de manière synchrone, la syllabe auditive /ba/ accompagnée de mouvements de lèvres qui correspondent à la prononciation de la syllabe /ga/. Pour un nombre important d'essais, les participants rapportent avoir entendu la syllabe /da/. Pour les auteurs, ce résultat serait la preuve d'une

⁶ L'effet de ventriloquie concerne, à l'origine, l'influence de la perception d'un mouvement articulaire des lèvres sur le jugement de la localisation spatiale de la source du son. Pour que l'illusion fonctionne, le ventriloque doit minimiser le mouvement de ses lèvres. Ainsi, les seuls indices visuels que le public peut associer avec la parole sont les mouvements des lèvres de la marionnette.

intégration des informations auditives et visuelles en un nouveau percept. Cependant, l'association inverse (i.e., /ga/ auditivement et /ba/ visuellement) est le plus souvent perçue comme une combinaison des consonnes (/bga/). Dans ce cas, la présence d'une articulation bilabiale, imposerait de fortes contraintes sur le son qu'il est possible d'entendre. Ainsi, les données suggèrent l'existence d'interactions entre le traitement des informations auditives et visuelles sous la forme d'une influence des informations visuelles sur le traitement auditif. Toutefois, les situations conflictuelles peuvent aussi mener à des perceptions différentes et séparées. Dans cette même étude, les participants rapportent une des syllabes unimodale dans un certain nombre d'essais.

Dans ces exemples de recherches, l'apparition d'un biais intersensoriel en réponse à une situation conflictuelle confirme l'existence d'interactions entre les systèmes sensoriels. Pour la plupart des auteurs, ces interactions seraient la preuve d'une intégration automatique des informations ayant lieu à un niveau très précoce de l'analyse des stimuli. Cependant, il semble que des conditions particulières soient requises afin d'observer ce type d'intégrations. Nous verrons par la suite qu'il existe un nombre important de facteurs spatiaux et temporels ainsi que des facteurs cognitifs qui peuvent influencer l'interaction entre les sens et la supposée intégration multisensorielle de l'information.

Si l'interaction multimodale peut engendrer des biais perceptifs en cas d'informations non congruentes en provenance des différents sens, elle est le plus souvent à l'origine d'améliorations perceptives. De manière générale, la présentation d'un stimulus quelconque dans une modalité peut orienter automatiquement l'attention vers sa zone d'émission (attention exogène) et faciliter le traitement d'un second stimulus dans une modalité différente à cette même localisation spatiale (pour une revue voir Spence & Driver, 2004). Des effets semblables ont été observés dans les processus d'attention endogène, c'est-à-dire lorsque la personne porte volontairement son attention vers une zone de l'espace prédéterminée dans l'attente d'une information sensorielle précise (pour une revue, voir Driver & Spence, 2004). Des débats théoriques existent néanmoins, en particulier pour déterminer si les effets intermodaux spatiaux doivent être considérés comme reflétant des mécanismes de base de l'intégration multisensorielle ou des mécanismes purement attentionnels, ou encore s'ils peuvent refléter une combinaison de ces processus.

Le phénomène d'interaction entre les systèmes sensoriels le plus étudié dans la littérature est le *transfert intermodal*. Dans ce cadre, la tâche la plus utilisée, l'appariement intermodal (*cross-modal matching*), consiste à utiliser les informations recueillies dans une

modalité sensorielle afin d'effectuer un jugement à propos d'un stimulus équivalent dans une autre modalité sensorielle (Hatwell, 1994). Bien que l'appariement intermodal soit clairement à considérer comme un phénomène intersensoriel, la nécessité d'une intégration multisensorielle peut être questionnée. L'intégration multisensorielle demande en effet de déterminer si deux entrées sensorielles proviennent du même objet alors que l'appariement sensoriel demande de déterminer si deux entrées successives sont équivalentes. Alors qu'un transfert d'informations est nécessaire dans la tâche d'appariement intermodal, l'intégration des différentes entrées sensorielles ne serait pas obligatoire.

1.2.1.1 La présentation multimodale de l'information

Nous allons maintenant nous intéresser aux situations de présentation multimodale des objets, où les informations sont présentées simultanément à différentes modalités sensorielles et sont concordantes. Le but sous-jacent d'une telle présentation est de favoriser l'émergence d'une véritable perception multimodale de l'objet. Ces situations seraient les seules à garantir sans ambiguïté une intégration de l'information en provenance des différentes modalités sensorielles en un percept unifié. Les premières données comportementales ont montré qu'un objet bimodal est mieux et plus rapidement traité que le même objet présenté dans une seule des modalités, et ceci quelle que soit la tâche à effectuer : détection (Forster, Cavina-Pratesi, Aglioti, & Berlucchi, 2002; Miller, 1986) ou identification de l'objet (Giard & Peronnet, 1999; Miller, 1982, 1991). Ces effets comportementaux facilitateurs ont été mis en évidence quelles que soient les modalités sensorielles impliquées. Par exemple, pour les modalités auditive et visuelle, Giard et Peronnet (1999) ont proposé à des participants de discriminer deux objets (A et B). Les objets étaient définis soit par une composante visuelle seule (ellipse horizontale pour l'objet A ou verticale pour l'objet B), soit par une composante auditive seule (son de 540 Hz pour l'objet A ou de 560 Hz pour B), soit par la combinaison des deux composantes. A chaque essai les participants devaient indiquer lequel des deux objets lui était présenté. Les résultats comportementaux montrent que les objets multisensoriels audio-visuels sont mieux et plus rapidement identifiés (562 ms) que lorsqu'ils ne sont présentés qu'auditivement (621 ms) ou visuellement (631 ms). Il faut noter que l'intérêt d'une présentation multimodale est accru lorsque la prise d'information est difficile, par exemple dans la perception de messages (non bruités) difficiles à comprendre en raison du fort accent étranger du locuteur ou de la difficulté sémantique du texte (Reisberg, McLean, & Goldfield, 1987). Pour les modalités visuelle et haptique, Ernst (2007) a examiné si de nouvelles associations pouvait être apprises entre deux signaux arbitraires. Pour cela, des adultes ont été

exposés pendant une phase d'entraînement à la combinaison de signaux généralement indépendants dans l'environnement, la luminance d'un objet (signal visuel) et sa rigidité (signal haptique). Par exemple, plus un objet était rigide, plus il était brillant. Les résultats montrent qu'à la suite de l'entraînement, les deux signaux qui étaient habituellement traités de manière indépendante, ne l'étaient plus : la discrimination des stimuli était dégradée lorsque l'association n'était pas congruente avec celle initialement proposée. Ainsi, des signaux sensoriels visuels et tactiles arbitraires peuvent être intégrés. D'après Ernst (2007), de telles associations seraient simplement apprises à partir de la présence de cooccurrences régulières entre signaux dans l'environnement.

De plus, les bénéfices d'une présentation multimodale ne se limitent pas à l'augmentation de la précision et de la rapidité du traitement de l'information. Un des apports les plus intéressants des recherches sur la perception multisensorielle concerne le fait que ses bénéfices peuvent persister même lors d'une présentation unimodale de l'objet (Shams & Seitz, 2008). Par exemple, Seitz, Kim, et Shams (2006) ont comparé les effets d'un apprentissage visuel et audio-visuel (Figure 8). Les participants devaient apprendre à détecter visuellement parmi deux stimuli celui qui contenait des points se déplaçant dans une même direction (vs. un déplacement aléatoire). Pendant les sessions d'apprentissage, les participants pouvaient se baser soit sur les informations visuelles (apprentissage unimodal visuel), soit sur les informations auditives (son directionnel ou stationnaire) et visuelles (apprentissage multimodal audio-visuel) pour résoudre la tâche. Les résultats ont montré une supériorité de l'apprentissage multimodal par rapport à l'apprentissage unimodal : les performances au cours de l'apprentissage sont toujours meilleures en condition d'apprentissage multimodal et un nombre moins important de sessions est nécessaire pour atteindre une performance optimale (c'est-à-dire que l'apprentissage multimodal est également plus rapide). De même, lorsque suite à l'apprentissage, les auteurs demandaient aux participants d'effectuer la tâche uniquement à partir d'une présentation visuelle, les personnes appartenant au groupe d'apprentissage multimodal obtenaient les meilleures performances. D'autres auteurs ont également mis en évidence le bénéfice d'une présentation multimodale initiale sur la reconnaissance unimodale d'un objet même après une présentation multimodale unique. Dans une tâche de « discrimination continue », Murray *et al.*, (2005) ont demandé à des participants de déclarer si les dessins d'objets communs qui leur étaient présentés l'étaient pour la première fois ou s'ils les avaient déjà vus au cours de l'expérience. La première apparition des dessins pouvait être visuelle uniquement ou accompagnée d'un son complexe, non pertinent pour la tâche. Il était demandé aux participants de ne pas prêter attention aux sons. Les

résultats montrent que les stimuli initialement présentés de manière multimodale étaient identifiés plus rapidement que lorsqu'ils avaient uniquement été présentés visuellement.

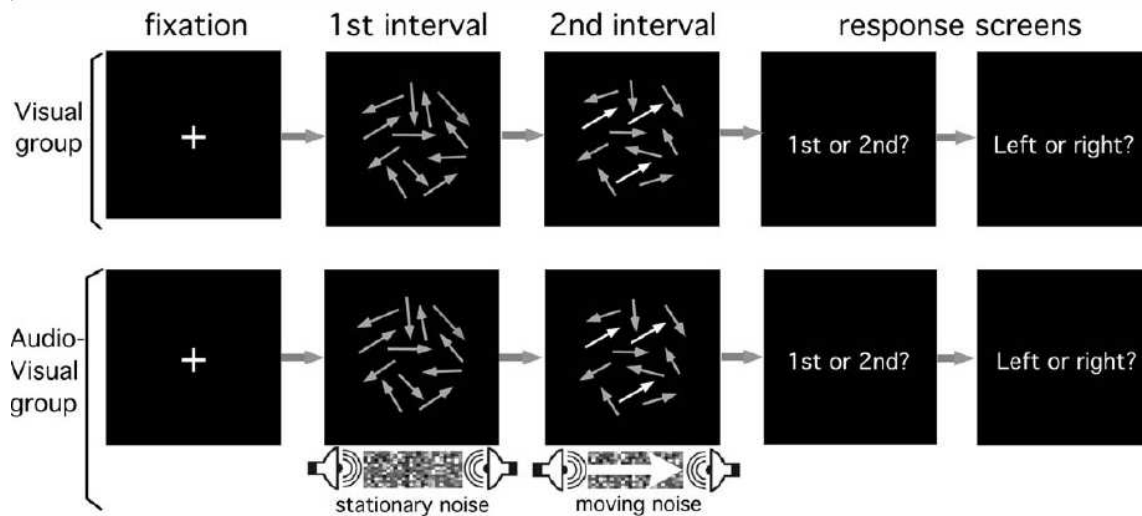


Figure 8. Schématisation de la tâche de détection de mouvements cohérents. Une séquence de deux écrans comprenant les stimuli était présentée (un contenant un signal directionnel et un seulement du bruit). Après la séquence, les participants devaient rapporter l'intervalle qui contenait le signal directionnel (1 ou 2), puis donner la direction du signal (gauche ou droite). Dans la phase d'entraînement un feedback était fourni pour la réponse concernant l'intervalle. Pendant la phase test, aucun feedback n'était donné. Les flèches indiquent la direction du mouvement des points ; les points qui évoluent dans la même direction sont représentés par des flèches blanches. La première ligne représente le déroulement d'un essai de la condition unimodale (visuelle), la seconde ligne, un essai de la condition multimodale (visuelle et auditive) [repris de Seitz et al., 2006].

1.2.2 Les conditions de la réussite

Un nombre très important de recherches est venu tempérer les phénomènes d'interactions multimodales. Ces recherches, sans remettre en cause l'avantage d'un apprentissage multisensoriel, amènent à réfléchir sur les facteurs qui peuvent venir modérer ses effets. En d'autres termes, nous tenterons de déterminer ici les facteurs qui permettent de garantir les bénéfices d'un apprentissage multisensoriel.

1.2.2.1 L'impact des facteurs sensoriels

Dans la survenue d'évènements multisensoriels, il apparaît que la contiguïté spatiale est plutôt la norme. Proposer des informations à la même localisation spatiale favoriserait leur intégration (Bertelson & Radeau, 1981; Congedo, Lecuyer, & Gentaz, 2006). Comme nous l'avons vu précédemment, Seitz et ses collaborateurs (2006) ont mis en évidence l'avantage d'un apprentissage multimodal comparativement à un apprentissage unimodal dans une tâche de détection visuelle de mouvements cohérents (Figure 8). Dans une seconde étude (Kim, Seitz, & Shams, 2008), les auteurs montrent que l'amélioration dans la tâche de détection

visuelle est bien dépendante de la présence, au moment de l'apprentissage, d'un flux sonore mais que la direction du son doit être congruente avec celle indiquée par le déplacement des points.

Par ailleurs, il apparaît également que la simultanéité temporelle est un élément important pour garantir l'interaction multimodale. Par exemple, Radeau & Bertelson (1987) montrent que l'effet de ventriloquie (la localisation d'un stimulus auditif vers la source visuelle apparente) est plus important lorsque les flux auditifs et visuels sont tous les deux continus, ou tous les deux intermittents à condition que leurs rythmes soient identiques. Dans un autre biais audio-visuel connu, un flash visuel accompagné de deux « bips » sonores est perçu comme une série de deux flashes, à condition que les deux stimulations soient contenues dans une fenêtre temporelle de 100 ms (Shams, Kamitani, & Shimojo, 2000). L'illusion perceptive commencerait même à décroître dès 70 ms de séparation entre les stimuli.

Il est donc à noter que la congruence spatiale et temporelle des composantes unimodales est importante pour l'amélioration de la perception multimodale. Une synchronie temporelle et une coïncidence spatiale renforcerait la probabilité que les deux informations recueillies proviennent d'un même objet ; elles doivent alors être intégrées.

L'intensité et la saillance relative des stimuli sont des facteurs sensoriels, qui ont un impact direct sur l'attention que la personne va porter à chacune des modalités sensorielles. Ainsi, l'augmentation de l'intensité d'un stimulus favorise la capture sensorielle par la modalité concernée et diminue celle des autres modalités. De la même manière, un stimulus rendu saillant par la modulation d'autres caractéristiques (e.g., continuité/discontinuité d'un flux visuel) est capable de dominer la perception multisensorielle (Radeau & Bertelson, 1987).

1.2.2.2 L'impact des facteurs cognitifs

En plus des facteurs sensoriels, certains facteurs cognitifs viennent influencer les interactions entre modalités sensorielles. Des influences *descendantes* (*top-down*) concernant la familiarité des informations et la connaissance d'une origine commune permettent d'améliorer les effets du traitement perceptif *ascendant* (*bottom-up*). Dans ce sens, Hellbig & Ernst (2007) ont proposé de vérifier si une consigne concernant la source des stimuli influence la contribution relative des modalités visuelle et haptique dans la perception de la taille des objets (Figure 9). Lorsque dans leur étude les informations visuelles et haptiques concernant la taille d'un objet étaient spatialement décorréées, l'intégration multisensorielle des informations était plus ou moins importante et semblait dépendre de la plus ou moins

grande distance entre les sources d'informations. Toutefois, lorsque la situation laissait penser que les informations perçues via les différentes modalités provenaient du même objet, alors les informations étaient automatiquement intégrées. La possibilité de contrôler visuellement l'exploration manuelle de l'objet augmente la cohérence perceptivo-motrice renforçant ainsi la croyance d'une origine commune de l'information. Cette croyance permettrait alors de supporter la différence de localisation spatiale des stimuli mais également des écarts temporels.

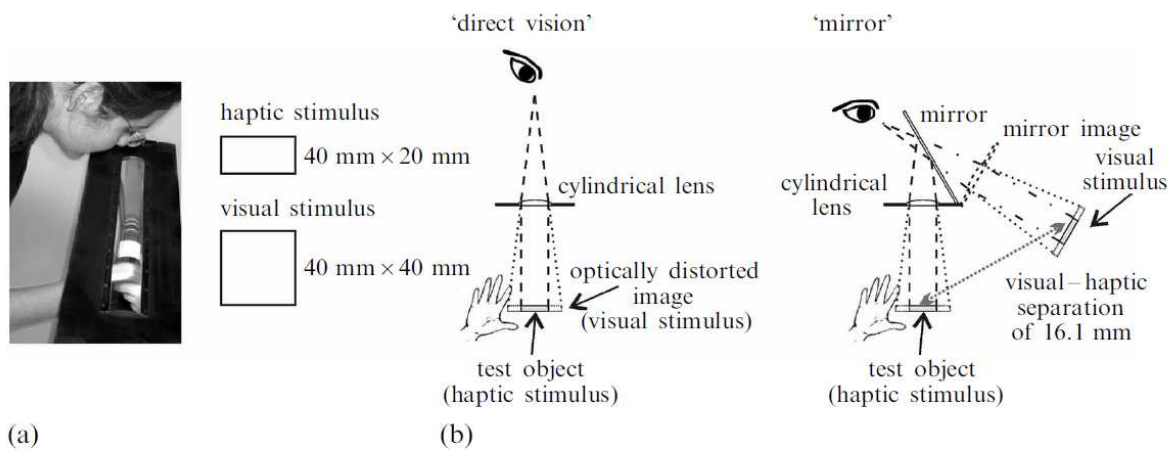


Figure 9. Schématisation de la situation expérimentale. (a) Les participants regardent les objets à travers une lentille cylindrique pendant qu'ils les saisissent. La forme visuelle est distordue et diffère donc de la forme spécifiée par le toucher (conflit sensoriel). (b) Dans une condition (vision directe), les participants regardent directement le stimulus. Les stimuli visuel et haptique correspondent spatialement. Dans la condition « miroir », les participants observent le stimulus visuel à travers un miroir. Ainsi, les stimuli visuel et haptique sont présentés à des localisations différentes. Les participants voient l'image miroir de leur main pendant qu'ils saisissent l'objet. Ils savent donc que les entrées sensorielles visuelle et haptique proviennent du même objet [repris de Hellbig et Ernst, 2007].

Enfin, le contenu sémantique de la situation a une influence sur le phénomène d'intégration multisensorielle. Cet effet a été mis en évidence par Von Kriegstein, Kleinschmidt et Giraud (2006) après avoir exposé brièvement des participants à des sonneries de téléphones, associées soit à des téléphones (photos d'objets) soit au nom de leur marque (e.g., Nokia, Samsung), et des voix associées soit à des visages (films des locuteurs) soit aux prénoms des personnes. Les auteurs ont trouvé un effet différentiel d'apprentissage multisensoriel lié à la nature de la relation entre les stimuli. Lorsque les stimuli sont sémantiquement reliés (voix/visages) les bénéfices de l'apprentissage sont plus importants que lorsque les stimuli sont reliés arbitrairement (voix/prénom, sonnerie/téléphone ou sonnerie/marque).

Il faut noter que les connaissances sémantiques et l'expérience antérieure des personnes peuvent promouvoir l'idée d'une source commune de l'information. Ces derniers facteurs sont liés au postulat d'unité des objets, qui justifierait le besoin d'une intégration multisensorielle afin d'améliorer leur perception.

1.2.3 L'intégration multisensorielle

1.2.3.1 La question de la dominance sensorielle

Traditionnellement la vision a été considérée comme la modalité dominante de notre perception du monde, notamment dans le domaine de la perception spatiale. Un très grand nombre de résultats a remis en question la notion de la dominance univoque d'une modalité sensorielle dans la perception. Par exemple, dans l'étude décrite précédemment de Shams et ses collègues (2000), les performances dans une tâche visuelle étaient altérées par des informations auditives bien qu'explicitement indiquées comme non pertinentes pour la tâche. De même, la perception visuelle (nombre de flashes) peut être influencée par une action motrice (Kunde & Kiesel, 2006) ou par des stimulations tactiles (Violentyev, Shimojo, & Shams, 2005). Ainsi, l'interaction entre les modalités sensorielles serait fortement dépendante du contexte de perception. La quantité et la qualité des informations disponibles sur les objets peuvent varier en fonction des conditions d'observation. La notion de capture ou de dominance sensorielle est alors toute relative. Aussi, dans une tâche de jugement de profondeur de cylindres, Young, Landy, et Maloney (1993) ont montré qu'en bruitant une modalité sensorielle (informations haptiques de texture ou informations visuelles de mouvement), les participants utilisaient davantage la modalité non bruitée que la modalité bruitée. Il a alors été avancé que la manière dont les personnes se servent des différentes sources d'informations sensorielles dépend de la fiabilité attribuée à chacune de ces informations dans un contexte particulier. Bresciani, Dammeier, et Ernst (2006) ont établi que la présentation conjointe de stimuli non congruents, respectivement tactiles ou visuels, biaisait la perception. Toutefois, le biais induit par la modalité tactile sur la vision était le plus important. Les auteurs montrent que dans une tâche de dénombrement, la modalité la plus fiable, en termes de variabilité des performances, est la modalité tactile.

1.2.3.2 La valeur de fiabilité des modalités sensorielles

Le débat concernant la dominance sensorielle est toujours vivace. Certains auteurs proposent qu'une modalité domine la perception dans une situation en fonction de sa

« précision » et de son « adéquation » (« appropriateness ») pour traiter l'information (Ernst & Banks, 2002; Welch & Warren, 1986). Ainsi, dans une tâche spatiale, la modalité visuelle domine habituellement parce que c'est la plus précise pour déterminer l'information spatiale. Cependant, pour des jugements temporels l'audition serait plus appropriée que la vision et dominerait alors la perception. Ce ne serait donc pas tant la modalité ou le stimulus qui déterminerait la dominance sensorielle, mais plutôt la valeur de fiabilité que nous accordons à la modalité dans son interaction avec un stimulus particulier. Une première hypothèse est que la fiabilité accordée à une information sensorielle est inversement liée à son ambiguïté (voir Jacobs, 2002).

Une autre hypothèse est que les personnes considèrent comme fiable un indice qui montre une forte corrélation avec les autres (voir Jacobs, 2002). Dans ce cadre, il a été spéculé que les personnes apprennent à percevoir visuellement le monde en comparant leurs percepts visuels avec les percepts obtenus lors des interactions motrices avec l'environnement (Berkeley, 1910). Atkins, Fiser et Jacobs (2001) ont récemment testé cette hypothèse. Les auteurs concluent que les stratégies d'intégrations sont dynamiquement modifiées en réponse aux changements de fiabilité des indices sensoriels tels que signalés par leurs confrontations au percept haptique.

1.2.3.3 Les modèles d'intégration multisensorielle

Pour Ernst et ses collaborateurs, il existerait deux stratégies générales pour combiner ces informations. La première, qualifiée de « combinaison sensorielle », consiste à maximiser l'information dérivée des différentes modalités. La seconde stratégie, appelée « intégration sensorielle » consiste à réduire la variance des estimations sensorielles afin d'augmenter leurs fiabilités. La combinaison sensorielle concernerait les interactions entre des signaux non redondants alors que l'intégration sensorielle décrirait les interactions entre signaux redondants, c'est-à-dire ceux concernant le même aspect de l'environnement. Le but final de l'intégration des différentes sources d'informations est de former un percept cohérent et fiable. Ernst et ses collègues proposent un modèle d'estimation probabiliste optimale (« *Maximum Likelihood Estimate* », *MLE*) qui permet d'obtenir le meilleur percept final c'est-à-dire le moins variable et le moins bruité possible. Il faut comprendre que chaque signal sensoriel recueilli par nos sens est bruité, et que l'estimation qui en découle également. Si le système nerveux devait par exemple opérer une dizaine calculs consécutifs pour évaluer une même propriété de l'environnement, chacune des dix estimations serait légèrement différentes. Dans le modèle *MLE*, le système prendrait en compte les estimations en

provenance de chaque sens mais celles-ci seraient pondérées par la variance associée à chaque modalité. Autrement dit, le poids relatif attribué à chaque modalité dépend de sa performance dans le traitement d'une caractéristique donnée dans une situation donnée. Une fois les différentes estimations pondérées par leur précision relative, elles sont combinées pour donner naissance à un percept final, potentiellement plus fiable que chacune des estimations unisensorielles. Afin de valider leur modèle, Ernst et Banks (2002) ont proposé de mesurer les performances d'individus dans une tâche de discrimination de la taille d'objets. Des conditions d'explorations unimodales visuelle ou haptique permettaient d'obtenir, pour chaque modalité, son niveau de performance et sa variance. Ainsi, les auteurs pouvaient prédire les poids accordés à chaque modalité et la fiabilité de l'intégration. Une condition d'exploration bimodale visuo-haptique était également proposée. Toutefois la fiabilité des informations était manipulée afin d'observer son effet sur le percept final. Les performances bimodales allaient dans le sens des prédictions du modèle *MLE* : l'ajout de bruit dans une modalité diminue la performance de discrimination de cette modalité et affaiblit donc son poids dans le phénomène d'intégration. Pour preuve, la pondération était en faveur de la modalité visuelle lorsque les informations visuelles n'étaient pas bruitées et basculait du côté de l'haptique lorsque l'information visuelle était très bruitée. Il semblerait également que la variance résultante soit moins importante dans la condition d'exploration bimodale. D'autres chercheurs ont également montré que les informations étaient intégrées de manière statistiquement optimale entre des modalités sensorielles comme la vision et l'audition (Alais & Burr, 2003).

Il faut toutefois noter que certains résultats ne sont pas en accord avec le modèle *MLE*. Dans une tâche de discrimination de rugosité de texture, Guest et Spence (2003) ne trouvent pas de supériorité de la présentation bimodale visuo-haptique. Les auteurs penchent alors en faveur d'un processus d'intégration utilisant les deux sources d'informations indépendamment. Le poids accordé aux modalités ne serait pas dépendant de leur efficacité relative dans la tâche actuelle, mais plutôt fonction de leur « validité écologique », c'est-à-dire leur efficacité habituelle dans la situation. Le principe général de pondération, dans une tâche de détection de texture, pourrait donc être de toujours donner avantage au toucher. Ainsi, que la texture soit grossière et donc aussi facilement accessible par le toucher et la vue, ou qu'elle soit fine et donc mieux discriminée par le toucher, donner un avantage systématique au toucher serait une stratégie suffisamment efficace.

1.2.3.4 Les bases neurales à l'origine de l'intégration multisensorielle

Malgré la grande variabilité des protocoles et des analyses proposées en imagerie, les études sur les interactions multimodales ont révélé un certain nombre d'aires corticales et sous-corticales impliquées de manière récurrente dans l'intégration multisensorielle. Parmi ces aires, nous retrouvons des aires sensorielles unimodales connues pour traiter les informations relatives à une modalité spécifique. Le phénomène d'intégration constaté au niveau des aires unimodales, parfois qualifié « d'intégration sensorielle précoce », a été mis en évidence pour une variété de combinaisons sensorielles différentes. Dans le phénomène d'intégration multisensorielle, nous retrouvons également impliquées des aires associatives qui peuvent recevoir des entrées en provenance de plusieurs modalités sensorielles. La structure multisensorielle la plus étudiée, et qui sert souvent de modèle à l'étude de l'intégration multisensorielle, est *colliculus supérieur* (CS) qui aurait comme caractéristique de contenir des neurones, dits *multisensoriels*, qui répondent à plus d'une modalité sensorielle. Les propriétés de ces neurones ont été étudiées dans le CS du chat (Stein & Meredith, 1993, voir Encart 2 pour plus de détails). Ainsi, les interactions multisensorielles apparaissent à divers niveaux du traitement perceptif.

Souvent, l'activation des aires sensorielles unimodales pour des informations en provenance d'autres modalités sensorielles a été interprétée comme étant le résultat d'un processus *descendant*. Lors de l'interaction avec l'environnement, les signaux sensoriels convergeraient dans un premier temps vers les aires associatives multimodales. L'arrivée synchrone des informations déclencherait le processus d'intégration puis, le signal intégré serait propagé en retour jusqu'aux aires unimodales. Ainsi, les représentations perceptives unimodales seraient modifiées suite à l'intégration multisensorielle. Dans ce sens, diverses projections *feedback* des aires multimodales vers les aires unimodales ont été mises en évidence (pour la modalité auditive, Schroeder et al., 2001; pour la vision, Falchier, Clavagnier, Barone, & Kennedy, 2002 ; et pour la somesthésie Cappe & Barone, 2005). Ces feedbacks pourraient refléter le contrôle des aires multimodales sur chacune des aires unimodales avec pour but l'amélioration du traitement du signal en vue de son intégration (Keyser et al., 2007).

Toutefois, d'autres auteurs suggèrent que l'activation des aires sensorielles unimodales est le fait d'un processus *ascendant*. Des données électrophysiologiques montrent d'ailleurs que des effets d'interactions apparaissent dès 40 ms après le début de la présentation des stimuli (Giard & Peronnet, 1999). Ceux-ci seraient consistants avec l'hypothèse d'une

interaction entre les diverses modalités sensorielles à un stage précoce du processus d'intégration multisensorielle. L'existence de nombreuses connections latérales entre les aires sensorielles unimodales (Falchier et al., 2002) suggère l'existence d'interactions pas uniquement de type feedback mais également de type feedforward (Calvert & Thesen, 2004). Certains auteurs proposent que l'activation simultanée des aires unimodales est le reflet d'une convergence multisensorielle précoce. Ils proposent également que la synchronisation des aires unimodales pourrait être coordonnée par des régions sous corticales (claustrum/insula, Murray, Malkova, & Goulet, 1998).

Encart 2 – Les neurones multisensoriels

C'est dans le *colliculus supérieur* (CS) du chat qu'ont été décrits pour la première fois les neurones multisensoriels (Stein & Meredith, 1993). Le colliculus supérieur jouerait un rôle important dans les comportements d'attention et d'orientation chez les mammifères. La réponse des neurones multisensoriels du CS est maximale lorsque les stimuli multisensoriels coïncident spatialement. Ceci serait la conséquence du chevauchement des champs récepteurs unimodaux dans le neurone multisensoriel (Figure 10). Ainsi, pour que la réponse de ces neurones multisensoriels puisse être augmentée, il faut que les composantes unimodales soient issues d'une même source spatiale. Lorsque les stimuli unimodaux sont issus de sources éloignées, la réponse est inchangée voire diminuée. De même, la synchronie temporelle assure une augmentation de la réponse des neurones multisensoriels. La réponse bimodale ou trimodale est d'autant plus forte que les composantes unimodales sont temporellement proches ; en cas de disparité temporelle, la réponse sera inchangée ou atténuée. Toutefois il existe une "fenêtre temporelle" relativement large au cours de laquelle l'intégration multisensorielle est possible. Finalement, lorsque deux stimuli sont proches dans le temps et l'espace, la réponse du neurone multisensoriel est supérieure à la réponse unisensorielle et même à la somme des réponses unimodales (*effet supra-additif*). De plus, si une entrée sensorielle est forte, l'augmentation d'activité induite par sa combinaison avec une composante d'une autre modalité sera faible, et vice-versa. C'est la règle d'*efficacité inverse* (Stein & Meredith, 1993). Cette propriété est intéressante au niveau comportemental car elle permettrait d'augmenter la saillance (baisse du seuil de détection) de stimuli peu efficaces.

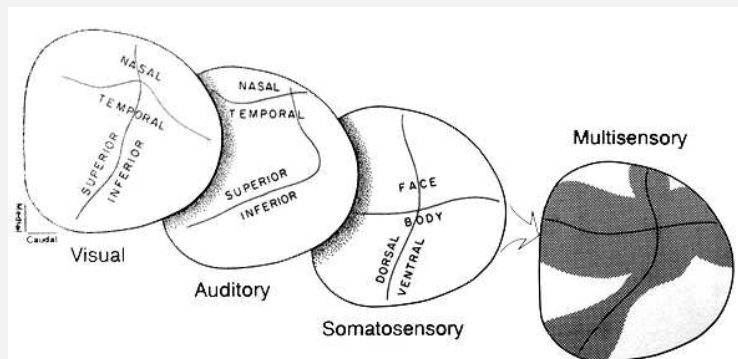


Figure 10. Superposition des cartes spatiales au niveau des colliculus supérieurs pour les modalités visuelle, auditive et somesthésique [Repris de Stein et Meredith, 1993].

1.2.4 Les mécanismes de l'apprentissage multisensoriel

Au cours de notre existence, nous apprenons de notre interaction avec l'environnement. Les personnes confrontées à la cooccurrence régulière d'informations seraient capables de les associer (Ernst, 2007). Nous avons également noté que les individus apprennent plus favorablement à partir d'une présentation multimodale de l'information qu'unimodale (Giard & Peronnet, 1999; Murray et al., 2005; Seitz et al., 2006). Les études en imagerie ont mis en évidence que l'intégration multisensorielle se produit à différents niveaux de la hiérarchie cérébrale et implique des connexions ascendantes, descendantes et transverses. Ces informations sont précieuses pour pouvoir répondre à une dernière question concernant l'apprentissage multisensoriel : comment une présentation multisensorielle d'objet peut-elle engendrer un effet bénéfique sur le traitement subséquent de ce même objet, lorsqu'il est présenté dans une seule modalité sensorielle ? L'efficacité d'un apprentissage résiderait dans sa capacité à modifier la représentation unimodale de l'objet (Figure 11, c, d). Il semble alors que l'avantage soit donné à la présentation multimodale, puisqu'un plus grand nombre d'aires cérébrales est activé simultanément par rapport à une présentation unisensorielle (Figure 11, a, b). Toutefois, diverses possibilités s'offrent à nous pour intégrer l'information en provenance de diverses sources sensorielles. Shams et Seitz (2008) pointent alors l'apparition d'une dichotomie entre les études qui suggèrent que le processus multisensoriel facilite les changements au sein des représentations unisensorielles (Figure 11, d), et celles qui suggèrent une modification ou une formation de représentations multisensorielles (Figure 11, e, f). D'une part, les modifications au sein des représentations unisensorielles pourraient être dues au fait que l'activité des neurones dans une modalité est modulée par l'activité des neurones en provenance d'une autre modalité. D'autre part, les modifications au sein des représentations multisensorielles pourraient être dues à une (ou des) modification(s), soit de la connectivité fonctionnelle entre les aires unisensorielles (Figure 11, e), soit des structures multisensorielles elles-mêmes ou la connectivité avec ces régions (Figure 11, f). Ainsi, la présentation ultérieure du stimulus unisensoriel activerait un large réseau d'aires cérébrales.

Cependant, il est important de noter que ces hypothèses d'apprentissage ne sont pas incompatibles. Au contraire, au regard des recherches sur l'intégration multisensorielle, il est probable que ces trois types de mécanismes coexistent et que leur implication dépende du type de tâche et des stimuli utilisés ainsi que de la durée de l'entraînement.

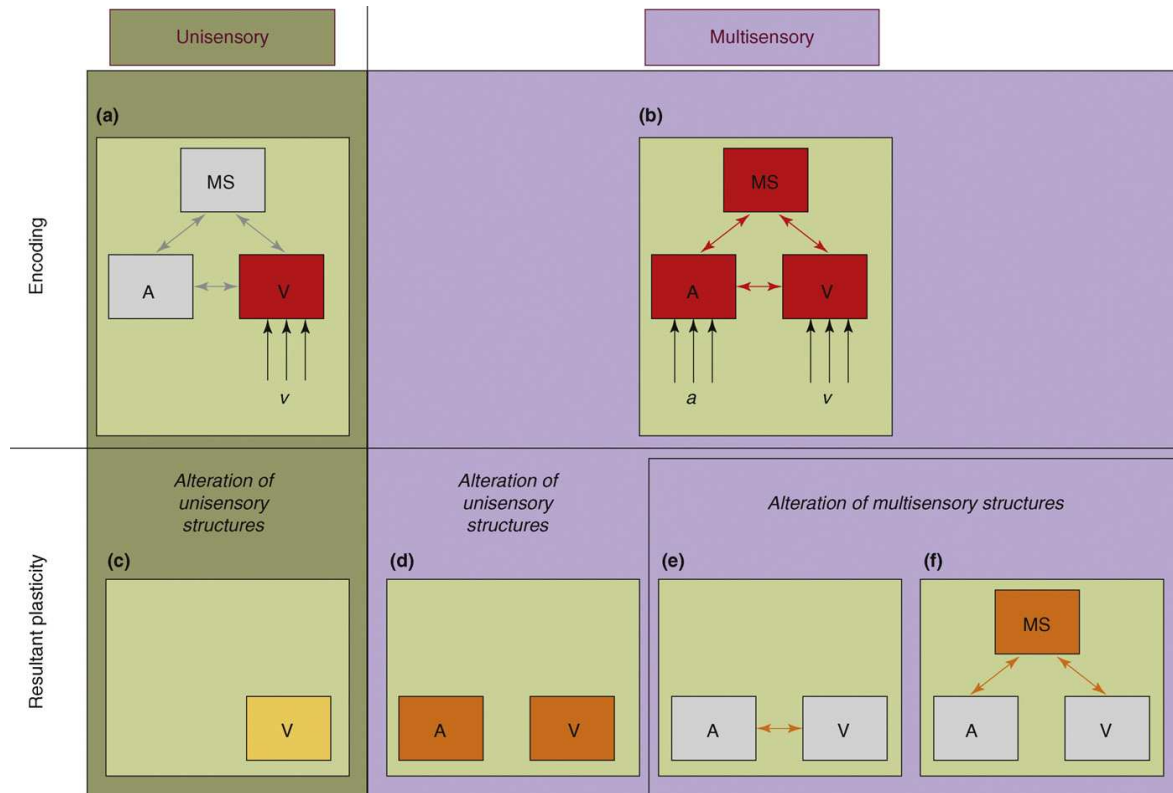


Figure 11. Schématisation des mécanismes d'apprentissage unisensoriel et multisensoriels. (a) pendant l'encodage dans l'entraînement unisensoriel, seules des entrées visuelles (*v*) sont présentes et seules des structures visuelles sont activées (en rouge). (b) Dans l'apprentissage multisensoriel, des entrées visuelles (*v*) et auditives (*a*) sont présentes et une série plus importante de structures de traitement est activée. A, V et MS représentent respectivement les aires auditives, visuelles et multisensorielles. (c), (d), (e) et (f) représentent les différentes modifications pouvant résulter de l'apprentissage. Les aires et connections qui sous-tendent l'apprentissage sont représentées en orange ; orange clair, pour de faibles degrés de plasticité et orange foncé pour de plus forts degrés. (c) Lors de l'entraînement unisensoriel, quelques modifications peuvent être effectuées dans les structures unisensorielles correspondantes. Avec l'entraînement multisensoriel, des modifications plus importantes peuvent être effectuées et peuvent se manifester dans des structures unisensorielles (d) ou multisensorielles (e) et (f)[adapté de Shams et Seitz, 2008].

Dans ce chapitre, nous avons vu que notre organisme est équipé de multiples modalités sensorielles lui permettant d'interagir avec le monde extérieur. Dans le cadre de la reconnaissance des objets, la modalité visuelle est la plus utilisée et la plus efficace dans le traitement des propriétés liées à la forme. Toutefois, la modalité haptique s'est révélée être une bonne candidate pour appréhender ces mêmes propriétés pour les objets tridimensionnels et même bidimensionnels, bien qu'un moins grand nombre d'informations soit disponible. Dans des conditions naturelles d'observations, les personnes ont la possibilité d'interagir avec les objets en impliquant plus d'une modalité sensorielle à la fois. Nous avons vu que la perception multisensorielle pouvait donner lieu, sous certaines conditions, à une amélioration de la perception. Dans le cadre des apprentissages, une présentation multisensorielle de l'information se révèle même particulièrement efficace pour apprendre à reconnaître les objets, qu'ils soient de nouveau présentés à l'ensemble des modalités impliquées au moment de l'apprentissage ou à une seule des modalités sensorielles.

Chapitre 2.

La lettre : un cas particulier d'apprentissage multimodal

Dans le champ de la reconnaissance visuelle des objets (voir chapitre 1.1.3), il existe un pan important de la littérature consacré à la reconnaissance des lettres. En effet, les lettres sont souvent utilisées comme matériel préférentiel dans les études sur la reconnaissance des objets. Les principaux avantages sont que les lettres sont des objets très familiers, puisqu'elles sont sur-apprises dans le cadre de l'apprentissage de la lecture et que les personnes lettrées les rencontrent un nombre de fois indénombrable au cours de leur vie de lecteur. Ce sont également des objets relativement simples, créés par l'homme, destinés à être facilement distinguables les uns des autres. En plus de leur identité visuelle (forme), les lettres, en tant qu'unités linguistiques, possèdent un nom et un son ainsi qu'un geste moteur associé pour les produire. La lettre se révèle donc être un objet d'étude particulièrement intéressant dans le champ des apprentissages multisensoriels. Nous allons dans un premier temps nous intéresser aux particularités visuelles et sensori-motrices des lettres. Puis, nous nous pencherons sur l'activité de lecture et ses modèles et verrons comment la lettre est considérée en leur sein. Enfin, nous étudierons les facteurs qui permettent de prédire la réussite dans l'acquisition de la lecture avant le début de son apprentissage, particulièrement autour de la lettre.

2.1 La lettre comme objet visuel et sensori-moteur particulier

2.1.1 La perception visuelle des lettres

2.1.1.1 Les modèles de la reconnaissance visuelle des lettres

Initialement, il a été proposé que la reconnaissance des lettres consiste en l'appariement d'une forme cible à l'exemplaire le plus proche de celle-ci en mémoire (de manière similaire au « *template-matching model* », voir partie 1.1.3.1). Ce type de modèle, a souvent été écarté par les psychologues dans le cadre de la reconnaissance visuelle des lettres pour son manque de réalisme. La critique majeure concerne le mécanisme de comparaison entre la forme perçue et la forme mémorisée. Nombre de chercheurs pensent que pour que l'image rétinienne, envoyée au cerveau, soit directement comparable à l'exemplaire stocké en mémoire, l'un ou l'autre ou encore les deux stimuli doivent subir un processus de

normalisation. Les premiers résultats expérimentaux vont dans le sens d'une augmentation des temps de réponse à mesure que la différence de taille entre le stimulus présenté et le stimulus attendu augmente (Cave & Kosslyn, 1989). Dans le même sens, lorsque l'orientation du stimulus présenté diffère de l'orientation canonique de l'objet, le taux de reconnaissance diminue (Larsen & Bundesen, 1992). Cependant, des résultats contradictoires ont été mis à jour notamment par Pelli, Burns, Farell et Moore-Page (2006) qui montrent que la précision de la reconnaissance de lettres est indépendante de la durée et de l'excentricité de la présentation ainsi que du contraste et de la taille des lettres. Ceci indiquerait que les lettres sont identifiées en utilisant un même processus quelque soit le point de vue adopté par l'observateur adulte.

Par la suite, il a été proposé que la reconnaissance des lettres puisse s'effectuer à partir de la reconnaissance de certains traits constitutifs des lettres (voir les modèles de *reconnaissance par composantes principales*, partie 1.1.3.2). Toutefois, ces deux approches ne sont pas totalement opposées, puisqu'il peut être proposé qu'un détecteur de traits peut jouer un rôle de comparateur entre la forme cible et le modèle mémorisé, lors du processus d'appariement. Le modèle *Pandémonium*, proposé par Selfridge en 1959 (cité par Lindsay & Norman, 1977), est un système de reconnaissance des lettres composé d'un nombre important de *démons* répartis en plusieurs couches, transmettant un signal nerveux de la rétine vers les plus hauts niveaux de traitements (Figure 12). Le *démon de l'image* transmet une image de la lettre aux *démons des caractéristiques*, qui répondent préférentiellement à la présence de certains traits, et transmettent l'information aux *démons cognitifs*, qui ne réagissent qu'à un certain patron d'activité présenté. Finalement, c'est le *démon décisionnel* qui décide de la lettre présentée sur la base de l'unité la plus active.

Au fil des années, un consensus s'est finalement développé autour des approches basées sur la reconnaissance de traits. Cette idée n'est pas nouvelle et a été formalisée, comme nous l'avons vu précédemment, dans le cadre de la reconnaissance des objets (Biederman, 1987; Marr & Nishihara, 1978) où il était proposé que la reconnaissance se fasse sur la base d'un petit nombre de composantes géométriques et de leur organisation. Tout comme les objets, les lettres de l'alphabet sont caractérisées par une série de traits typiques dont les différentes combinaisons permettent la construction de lettres uniques (Gibson, 1971). Ces traits et leur organisation pourraient donc être à la base de la reconnaissance des lettres. Des recherches récentes ont apporté des éléments en faveur de cette hypothèse. Pelli et ses collègues (2006) ont montré, pour une grande variété de formes de lettres, alphabets latins,

arabe, chinois ou encore artificiels, que la précision de la reconnaissance est toujours inversement proportionnelle à la complexité de la lettre. La mesure qu'ils utilisent pour évaluer la complexité des lettres, appelée *complexité périmétrique* (voir Pelli et al., 2006 pour plus de détails), est supposée proportionnelle au nombre de traits. Ce résultat va dans le sens d'un traitement de la lettre par composantes. En effet, dans le cas d'un traitement global de la forme de la lettre pour un appariement à un modèle interne, les auteurs auraient du recueillir des scores de précisions équivalents peu importe la complexité de la lettre présentée. Cependant et jusqu'à présent, les chercheurs sont loin d'être clairs concernant les parties des lettres qui doivent être considérées comme des traits élémentaires. Pour être pleinement efficaces, les théories de reconnaissance par composantes doivent pouvoir fournir des règles qui spécifient comment les caractéristiques se combinent et interagissent selon les contextes.

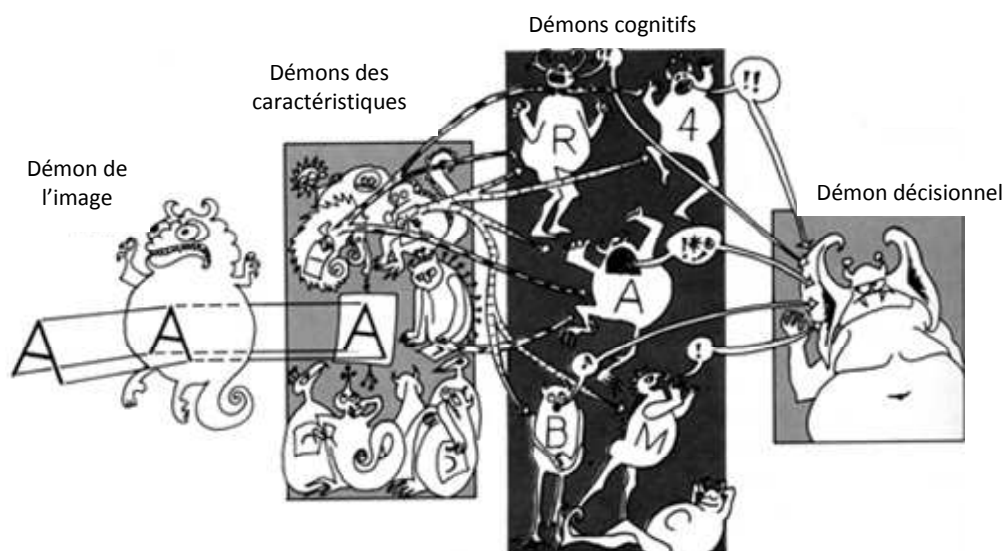


Figure 12. Le modèle Pandémonium [adapté de Lindsay et Norman, 1977].

Les traits caractéristiques à la base de la reconnaissance visuelle des lettres

Certaines recherches se sont penchées sur la nature des traits et le déroulé temporel du processus qui est responsable du passage d'une lettre représentée par des traits spécifiques à son identité graphique. Gibson (1969) propose, pour l'ensemble des lettres majuscules de l'alphabet, une tâche qui consiste à décider si les lettres présentées deux à deux sont identiques. Les temps de réaction recueillis sont ensuite rapportés aux similarités entre les lettres ; plus le temps nécessaire pour fournir la réponse est long et plus il est supposé que le nombre de traits partagés par les lettres est important. Suite à cette étude, Gibson postule l'existence de trois sous-ensembles de caractéristiques auxquels les observateurs seraient

sensibles : les lignes (horizontales, verticales et obliques), les courbes (fermées, ouvertes horizontalement et ouvertes verticalement) et les intersections. La prise en compte des « redondances », c'est-à-dire des éléments fréquents ou symétriques, et des « discontinuités » dans le tracé, auraient également une importance dans la reconnaissance des lettres particulières. Il faut toutefois noter que les caractéristiques supposées clés de la reconnaissance des lettres sont inférées suite à l'observation et ne sont pas directement testées.

D'autres méthodes ont été utilisées dans la littérature pour évaluer la pertinence des différents traits dans la reconnaissance des lettres. De nombreux auteurs ont privilégié l'utilisation de *matrices de confusions* qui consistent à recenser, pour chaque lettre de l'alphabet, les erreurs d'identification sur l'ensemble des réponses possibles. Ces matrices de confusions servent alors à définir les traits nécessaires afin de distinguer une lettre d'une autre. Dans ce cadre, la confusion fréquente entre le E et le F majuscule serait une preuve que l'élément important pour identifier le E est la ligne horizontale inférieure. Toutefois, nous pouvons nous demander si la partie de la ligne importante pour la bonne identification de la lettre est la terminaison ou la barre elle-même. Il semblerait également que les matrices de confusions puissent être interprétées non seulement en termes de partage de caractéristiques mais aussi comme la preuve de l'existence d'un certain recouvrement entre les formes (Gervais, Harvey, & Roberts, 1984). De plus, la création de matrices de confusions suppose que le participant effectue un nombre suffisant d'erreurs, généralement autour de 50%, pour avoir la chance d'observer des confusions systématiques entre lettres. Afin d'obtenir un taux d'erreurs suffisant, les auteurs proposent souvent des conditions de présentation particulières des lettres, comme une présentation tachistoscopique, et donc très réduite dans le temps, ou en diminuant les contrastes. Nous pouvons alors nous demander si cette méthodologie est la plus adaptée pour déterminer le type de caractéristiques qui sous-tend la reconnaissance des lettres. D'autant plus que ces deux types de présentations exacerberaient l'importance relative des basses fréquences spatiales. En effet, les basses fréquences qui sont véhiculées plus rapidement par le système nerveux (voie magno-cellulaire) fourniraient un aperçu global de la forme qui bien que permettant une première analyse, devra être infirmée ou validée par une analyse plus fine portée par les hautes fréquences spatiales, qui demandent un temps plus important pour être prises en compte (Peyrin, et al., 2005). Enfin et comme précédemment, dans le cas des matrices de confusions, les caractéristiques clés de la reconnaissance des lettres sont inférées.

Plus récemment, des auteurs se sont inspirés de la technique de « délétion » d'éléments de Biederman (1987) où l'importance d'une caractéristique est évaluée en regardant comment sa suppression affecte la performance de reconnaissance par rapport à la suppression d'autres caractéristiques. Lanthier, Risko, Stolz, et Besner (2009) ont ainsi trouvé que les sommets étaient des éléments plus importants que les segments dits intermédiaires. D'autres chercheurs ont proposé d'appliquer une technique, appelée « *bubbles* », connue dans le champ de la classification d'image dont la logique est proche de la technique proposée par Biederman (Fiset et al., 2009; Fiset et al., 2008). De façon générale, la méthode consiste à présenter aux participants des stimuli partiellement échantillonnés. À chaque présentation, les parties révélées sont aléatoirement choisies, de sorte qu'après un nombre relativement élevé d'essais, tout l'espace de recherche est échantillonné. L'analyse des données repose sur le postulat qu'il existe une corrélation entre les réponses des personnes (proportion de bonnes réponses) et les régions échantillonnées à chaque essai. Les résultats ont mis en évidence la plus grande importance des traits horizontaux et des terminaisons parmi l'ensemble des éléments possibles (e.g., intersections, horizontales, verticales, obliques, Fiset et al, 2008). L'originalité supplémentaire proposée par Fiset et ses collaborateurs (2009) a été d'étendre la méthode *bubbles* en proposant une version dynamique. Ainsi, la probabilité d'une réponse correcte devrait diminuer si l'information spatiale pertinente à un moment donné, n'est pas révélée au bon moment. Les résultats montrent une modulation de l'importance relative des traits au cours du temps. Les caractéristiques clés de la reconnaissance des lettres ne seraient donc pas toujours extraites simultanément. Toutefois, bien que l'importance des caractéristiques soit ici évaluée expérimentalement, nous remarquons que quelle que soit la méthode utilisée, il existe toujours une définition *a priori* des différents traits caractéristiques des lettres et de leur organisation.

2.1.1.2 Les représentations abstraites de l'identité des lettres.

Bien que la plupart des chercheurs ait adopté une approche de la reconnaissance des lettres par traits caractéristiques, il semblerait que le consensus ne soit pas encore total sur la nature et l'importance relative de ces derniers. Une question qui s'impose est de savoir comment les lettres, quelles que soient les modifications de surface (e.g., casse, police) qui leurs sont appliquées, peuvent être reconnues à partir de l'extraction de leurs traits constitutifs.

Un certain nombre de recherches propose l'existence de représentations de l'identité des lettres, abstraites de leur apparence visuelle (en anglais *ALI* pour *abstract letter identity* ou

ALU pour *abstract letter unit*). Cette hypothèse s'appuie sur divers résultats expérimentaux et observations. Par exemple, quand des mots sont présentés très brièvement, les participants sont capables de reporter la plupart des lettres composant les mots mais se révèlent incapables de préciser la casse (Adams, 1979). De nombreuses études se sont appuyées sur le paradigme d'appariement de lettres. Dans l'étude de Posner et Keele (1967), les participants devaient répondre si oui ou non deux lettres présentées séquentiellement avaient le même nom. Le rapport d'identité pouvait être soit physique (paires de type A/A) soit nominale (A/a). Les résultats montrent que les réponses aux paires « A/A » étaient largement facilitées par rapport aux réponses aux paires « A/a » ou aux paires différentes (A/B ou A/b). Selon les auteurs, cela montrerait que le traitement des lettres repose sur l'activation de deux codes distincts, le code visuel et le code nominal. Le code visuel représenterait la forme de la lettre et serait disponible plus rapidement que le code nominal qui permettrait de s'abstraire de la forme visuelle de la lettre et de décider si deux lettres possèdent le même nom. Quand deux lettres sont identiques visuellement, le traitement visuel serait plus rapide que lorsque les lettres sont différentes, et déterminer qu'elles possèdent le même nom serait par conséquent plus rapide. Selon cette hypothèse, le code visuel pourrait très bien s'apparenter au niveau de détection des traits caractéristiques des lettres, proposés dans les modèles de la reconnaissance des lettres.

Notons toutefois que dans une tâche de dénomination de lettres, Arguin et Bub (1995) ne trouvent pas d'effet d'amorçage lorsqu'ils manipulent la similarité phonologique entre l'amorce et la cible (N/M) et concluent que la phonologie n'intervient pas dans le processus d'abstraction de la forme des lettres. Cette conclusion a été discutée par Bowers, Vigliocco, et Haan (1998) qui trouvent un important effet d'amorçage dans une tâche de dénomination de lettres suite à la présentation de lettres homophones. Mycroft, Hanley, et Kay (2002) montrent, chez une patiente alexique⁷, que discriminer l'orientation d'une lettre ou l'apparier avec la même lettre écrite dans une autre police n'est pas perturbée par l'abolition de l'accès aux représentations phonologiques (elle était incapable de lire le moindre mot ou de dénommer une lettre présentée visuellement). Les auteurs suggèrent que le déficit concerne la connexion entre les représentations abstraites de l'identité des lettres préservées et les représentations des noms des lettres dans le lexique de sortie. Ceci mettrait en évidence que

⁷ L'alexie pure ou « cécité verbale » est un déficit de lecture acquis suite à une lésion cérébrale, qui se traduit pour la plupart des patients par une stratégie de lecture lettre-à-lettre (*LBL*, pour *letter-by-letter*), qui entraîne des temps de lecture à haute-voix extrêmement long et des effets de longueur du mot. Chez la grande majorité des patients, il existe une altération du traitement des lettres isolées ; les lettres ne peuvent être nommées ou lorsqu'elles le sont, les temps de latence se révèlent très importants (Behrmann, Plaut, & Nelson, 1998).

les étapes précoces de l'analyse des lettres sont essentiellement de nature visuo-spatiale, non verbale. Par ailleurs, les effets d'amorçages diffèrent notablement lorsque la lettre doit être identifiée explicitement, comme dans une tâche de dénomination, ou simplement catégorisée dans une tâche de décision alphabétique (le stimulus présenté est-il une lettre ou un autre symbole ?). L'utilisation différentielle de ces deux tâches a permis d'étudier plus spécifiquement le processus d'abstraction de la forme des lettres et la nature des *ALIs*. Dans la tâche de décision alphabétique, les réponses pour les lettres sont facilitées lorsque l'amorce est une lettre (B/A), indépendamment de son identité, par rapport à la situation où l'amorce est une non-lettre (* /A). Cet effet d'amorçage est interprété comme une « préactivation » des représentations spécifiques aux lettres (Arguin & Bub, 1995). De plus, l'effet d'amorçage étant beaucoup plus fort lorsque l'amorce est une lettre physiquement identique (A/A) plutôt qu'une lettre nominalement identique (a/A), les auteurs proposent que les processus de catégorisation du stimulus reposent essentiellement sur l'activation des représentations visuelles. Dans le cadre de la tâche de dénomination, par contre, l'effet de facilitation est le même pour les amorces physiquement et nominalement identiques, ce qui impliquerait que le participant passe par des représentations indépendantes de la forme pour identifier précisément les lettres (Arguin & Bub, 1995). A l'appui des propos d'Arguin et Bub (1995), nous pouvons citer les recherches de Miozzo et Caramazza (1998). Ils rapportent que leur patiente n'était pas capable de dénommer les lettres et avait perdu la capacité de reconnaître qu'une lettre était la même lorsqu'elle était présentée dans une casse différente. Pourtant, elle était toujours capable de déterminer si une forme graphique était une lettre ou une non-lettre et de reconnaître si une lettre était correctement orientée ou non. Ces études confirment globalement l'existence de deux niveaux de traitement des lettres: un niveau où la configuration visuelle du stimulus est analysée, qui pourrait être compatible avec une reconnaissance des lettres par traits caractéristiques, et un niveau supérieur, mis en jeu plus tardivement, qui abouti aux représentations abstraites de l'identité des lettres qui sont indépendantes de la forme visuelle. Dans ce sens, chez certains patients alexiques, lorsque l'analyse des lettres est touchée à un niveau précoce, la mise en place des *ALIs* serait perturbée (Arguin & Bub, 1993; Miozzo & Caramazza, 1998). Dans une étude de Petit, Midgley, Holcomb et Grainger (2006), utilisant les potentiels évoqués associés aux événements (*ERPs* pour event-related potentials), les auteurs ont pu séparer les corrélats électrophysiologiques liés à ces deux niveaux de traitements. Dans un premier temps, il existerait un traitement visuel de bas niveau (entre 120 et 180 ms après le début de la présentation). Ce résultat serait en accord avec les études qui montrent une activation précoce

au niveau des régions occipito-temporales bilatérales (~ 100 ms) et qui est interprétée comme l'étape visuelle de bas niveau d'extraction des traits caractéristiques des lettres (Cornelissen, Tarkiainen, Helenius, & Salmelin, 2003; Tarkiainen, Helenius, Hansen, Cornelissen, & Salmelin, 1999). Dans un second temps, il y aurait une mise en jeu des représentations abstraites (entre 220 et 300 ms). Il s'agirait du plus haut niveau de représentation de la lettre qui permettrait l'accès aux informations phonologiques, articulatoires et lexicales (composant des mots) de la lettre. Toutefois, entre le niveau d'extraction des caractéristiques élémentaires des lettres et le niveau de représentation totalement indépendant de la forme des lettres, les auteurs notent qu'il existerait entre 180 et 220 ms un niveau de traitement visuel qui serait sensible à la spécificité de la casse de la lettre.

2.1.1.3 La reconnaissance des lettres est-elle l'étape initiale de la reconnaissance des mots écrits ?

Un débat théorique autour de l'unité perceptive à la base de la reconnaissance des mots écrits a été engagé il y a de nombreuses années. Déterminer la nature des mécanismes perceptifs à l'origine de la reconnaissance visuelle des mots a un grand intérêt pour l'apprentissage de la lecture et de l'écriture. Alors que certaines recherches suggèrent qu'ils s'appuient sur la « forme visuelle du mot », d'autres chercheurs insistent sur le rôle prépondérant de la reconnaissance individuelle des lettres qui composent les mots (Paap, Newsome, & Noel, 1984 ; pour des études qui confrontent ces deux hypothèses voir, Adams, 1979; McClelland, 1977). Adams (1979) est un des premiers auteurs à apporter des arguments expérimentaux en faveur des lettres comme unités de base du traitement des mots écrits. Elle note, chez des adultes, un « effet de supériorité du mot » : à la suite de la présentation de mots courts fréquents (e.g., read) et de pseudo-mots réguliers (i.e., prononçables comme berm, fint), les participants reportaient l'ensemble des lettres composant les stimuli plus rapidement pour les mots que les pseudo-mots. Toutefois, nombre de modèles de la reconnaissance des mots écrits, qu'ils soient basés sur la reconnaissance de la forme globale du mot ou des lettres le composant, prédisent un effet de supériorité du mot (Allen & Emerson, 1991). De manière plus intéressante, l'effet de supériorité du mot n'était pas affecté par la distorsion de la typographie des stimuli (e.g., **back**), ce qui prouverait que les participants ne se basent pas sur la forme globale du mot mais bien sur l'analyse des lettres le constituant. En effet, alterner la casse, la police ou la taille des lettres à l'intérieur des mots, écarte indéniablement la possibilité de les traiter de manière holistique, c'est-à-dire à partir de leur forme. La plupart des recherches actuelles s'est centrée sur l'hypothèse d'un traitement visuel du mot basé sur

l'analyse de ses lettres. Récemment, Pelli, Farell et Moore (2003) ont montré que les mots, particulièrement les mots longs, sont lisibles à condition que les lettres soient individuellement identifiables.

Par ailleurs, Burgund, Schlaggar et Peterson (2006), ont montré, d'un point de vue développemental, que la spécialisation du système perceptif pour les lettres est liée à l'augmentation des compétences en lecture. Il existe, en effet, une forte corrélation entre la précision et la vitesse de traitement des lettres et la fluidité de la lecture (Behrmann et al., 1998 ; Laberge & Samuels, 1974). De fait, le traitement des mots est différent chez les lecteurs débutants et les lecteurs experts. Il est noté chez le lecteur débutant une augmentation considérable des latences de lecture en fonction de la longueur des mots, accompagnée d'un nombre important de fixations à l'intérieur d'un même mot (Aghababian & Nazir, 2000). Le lecteur débutant, traiterait les lettres de manière sérielle, ce qui rend le processus de recodage phonologique lent et laborieux. Au contraire, l'absence de l'effet de longueur du mot chez le lecteur expert a été interprétée comme la preuve d'un traitement parallèle des lettres dans la reconnaissance des mots écrits (Coltheart et al, 1993 ; Laberge & Samuels, 1974). L'expérience de la lecture entraîne donc une certaine expertise perceptive qui influence la rapidité et la manière dont l'information visuelle est extraite des mots.

Dans ce cadre, une exposition répétée à certaines lettres ou groupements de lettres va avoir une influence sur notre manière de lire. Le lecteur expert pourrait s'appuyer sur un traitement plus global du mot en prêtant moins d'attention au traitement particulier des lettres. Rey, Ziegler et Jacobs (2000) postulent que l'unité perceptive minimale traitée pendant la lecture est le graphème⁸. Ils ont en effet montré, en français et en anglais, que détecter une lettre cible dans un graphème composé de plusieurs lettres (e.g., A dans **BEACH**) se révèle plus difficile que dans un graphème d'une seule lettre (e.g., A dans **PLACE**). Les auteurs pensent que pendant l'acquisition de la lecture, les lecteurs développent, suite à une exposition répétée aux patrons d'associations graphèmes-phonèmes, des représentations internes des graphèmes. Ces représentations seraient privilégiées par rapport aux lettres dans l'activité de lecture parce qu'elles permettraient une correspondance plus directe entre orthographe et phonologie. D'autres chercheurs pensent que des unités supra-ordonnées aux lettres, comme la forme des mots, jouent un rôle dans la reconnaissance visuelle des mots. Par exemple, pour Healy et ses collaborateurs (Drewnowski & Healy, 1977; pour une revue voir

⁸ En français, il existe 26 lettres de l'alphabet pour transcrire les quelques 36 phonèmes.

Healy, 1994), les lecteurs experts pourraient s'appuyer sur des unités plus importantes que la lettre, comme le mot ou même de petites phrases, pour lire. Dans une tâche simple de barrage de lettres dans un texte, les auteurs montrent que les lecteurs effectuent un grand nombre d'erreurs de détection de lettres cibles dans des mots familiers tel que *the* et *and*. Ils expliquent cet effet de la « lettre manquée » par un phénomène dit « d'unification » ; le mot familier serait perçu comme un tout. Perea et Rosa (2002) ont montré qu'en alternant la taille des lettres dans le mot (i.e., en modifiant la forme des mots), les mots de basse fréquence d'occurrence étaient moins rapidement identifiés comme étant des mots (tâche de décision lexicale) que les mots de haute fréquence.

Finalement, bien qu'il n'y ait pas de doute sur l'importance du traitement visuel des lettres dans la reconnaissance des mots écrits, la prise en compte du niveau d'expertise du lecteur redistribue quelque peu les cartes entre les différentes théories que nous avons abordées.

2.1.2 L'écriture (le tracé) des lettres

Nous venons de voir que les lettres sont des objets visuels particuliers à la base de la reconnaissance des mots écrits. Bien que le traitement visuel de leurs formes se rapproche du traitement visuel des objets, les lettres doivent, en tant qu'unités linguistiques, pouvoir être associées à un nom et un son de manière univoque. Les lettres sont également destinées à être écrites. Les gestes d'écriture qui permettent de les tracer sont intrinsèquement liés à la forme visuelle de la lettre. Nous allons voir que ce geste demande un certain niveau de compétences motrices et implique des règles motrices particulières. Nous envisagerons par la suite la possibilité d'interactions perceptivo-motrices et d'influence de la production des lettres sur la construction de leurs représentations visuelles.

2.1.2.1 Les règles de production motrice de l'écriture

L'écriture est une activité motrice complexe gérée par de nombreuses règles de production. Nous allons voir qu'il existe, en effet, des constances dans la manière d'écrire chez les enfants et les adultes.

En tant qu'activité motrice, l'écriture met en jeu des articulations proximales, l'épaule et le coude (responsables des mouvements du bras et de l'avant bras), et des articulations distales, le poignet et la main (responsables des mouvements de la main et des doigts). Ce système effecteur, aux multiples degrés de libertés, permet de produire des mouvements

séquentiels d'écriture qui respectent de fortes contraintes, notamment spatiales, liées à l'aspect normatif de l'écriture (produire des lettres de taille normale entre les lignes d'un cahier). Pendant l'activité d'écriture, les articulations proximales sont responsables des mouvements de grandes amplitudes, des translations gauche/droite, des retours à la ligne ou encore des sauts de lignes, c'est-à-dire de l'ensemble des mouvements assurant l'agencement spatial des formes graphiques ou « *topocinèses* ». Les articulations distales sont, quant à elles, responsables de la réalisation des composantes dites « *morphocinétiques* » de l'écriture, c'est-à-dire de la forme ou encore de l'ordre de production des lettres. C'est essentiellement l'aspect morphocinétique qui nous intéressera, puisque c'est cette composante du geste qui est directement liée à la forme des lettres. Ces deux composantes relèvent de modes de contrôle du mouvement différents (Paillard, 1990). Le contrôle des aspects topocinétiques de l'écriture s'effectuerait principalement de manière dite « *rétroactive* » car il se baserait sur des retours sensoriels essentiellement visuels et tactilo-kinesthésiques. En effet, l'absence de vision modifie l'agencement spatial, comme la localisation du point sur le « i » ou de la barre du « t » (Smyth & Silvers, 1987). Le mode de contrôle des aspects morphocinétiques est qualifié de « *proactif* ». Indépendamment de la présence d'informations sensorielles, une grande invariance de la forme et de la durée des tracés est notée. Il faut cependant noter que les enfants sont sensibles à la suppression des informations visuelles, la qualité des productions diminuerait et la durée augmenterait (Sovik, 1974). De plus, en l'absence de retours visuels, il est classiquement observé une augmentation de la taille des lettres et de la pression (Chartrel & Vinter, 2006; Zesiger, 1995). Ces augmentations seraient une stratégie de maximisation des feedbacks tactilo-kinesthésiques afin de compenser l'absence de retours visuels (Van Doorn & Keuss, 1992, 1993). Le mode de contrôle des mouvements serait donc essentiellement rétroactif au début de l'apprentissage avant d'évoluer vers un contrôle proactif. La mise en place d'un contrôle proactif implique la constitution d'une représentation motrice des mouvements (*programmes moteurs*) qui permettra une exécution automatisée des lettres et garantira l'invariance. C'est l'étude des invariants moteurs qui va nous permettre de déterminer la nature de ces programmes. En effet, ce sont les paramètres du mouvement qui sont les moins perturbés par les variations du contexte d'exécution qui sont les plus susceptibles d'être encodés dans la structure du programme moteur.

La grammaire de l'action

Ecrire ou dessiner consiste à produire séquentiellement les traits qui composent les différentes formes. Chaque trait doit être produit à sa juste place dans la séquence temporelle,

et être tracé dans la bonne direction. La métaphore « *grammaire de l'action* » a été proposée pour définir les règles qui régissent la production des traits de figures géométriques (Goodnow & Levine, 1973). Pour Goodnow et Levine (1973), le tracé de chaque forme est spécifié par une série de règles qui indique le point de départ (e.g., le coin supérieur gauche) et la manière dont il faut procéder le long de la trajectoire (e.g., les lignes verticales sont tracées du haut vers le bas et les lignes horizontales de gauche à droite). Les explications concernant l'émergence de ces règles sont multiples. De manière générale, une règle serait appropriée lorsque son application facilite à la fois la préparation et l'exécution du geste pour le segment impliqué, du point de vue biomécanique (Thomassen & Van Galen, 1992).

Les règles de production dépendraient également des caractéristiques propres aux personnes (droitier/gaucher) et du type de formes à produire, qui imposeraient certaines contraintes motrices. Dans ce sens, l'écriture des lettres est particulièrement normative (e.g., progression gauche-droite et utilisation du sens de rotation anti-horaire, pour les lettres latines). Afin de respecter les règles de production imposées par les lettres, l'enfant doit procéder à un certain nombre d'adaptations dans les règles qu'il utilise pour dessiner. En effet, il a été montré que pour écrire leurs premières lettres, les enfants utilisent en général les mêmes règles de production que celles utilisées pour le dessin. Les études développementales sur le tracé de cercles et de boucles montrent que les jeunes enfants dessinent les cercles dans le sens des aiguilles d'une montre alors que les enfants plus âgés préfèrent le sens inverse (Meulenbroek, Vinter, & Mounoud, 1993). Le sens de rotation des lettres cursives, qui se fait dans le sens anti-horaire, impose alors des contraintes motrices fortes aux jeunes enfants qui doivent apprendre à maîtriser ce tracé. C'est la pratique des activités d'écriture qui induirait des changements dans le sens de production des traits. Cependant, dans son étude qui consistait à comparer la production de lettres en script, minuscules et majuscules, avant et après l'apprentissage de l'écriture, Simner (1981) observe que les enfants, dans la plupart des cas, suivent les règles de production du dessin. De plus, il ne trouve pas d'effet de l'apprentissage de l'écriture sur l'ordre de production des traits. En particulier, comme pour le dessin de formes géométriques (Goodnow & Levine, 1973), la production de lettres débutait majoritairement dans le coin supérieur gauche et dans tous les cas, les traits horizontaux étaient produits de gauche à droite. Il faut toutefois noter que les enfants de cette étude recevaient uniquement 10 à 15 minutes d'instruction à l'écriture par jour, soit une durée peut-être insuffisante pour induire un changement dans la grammaire de l'action.

En résumé, les recherches montrent l'existence de certaines règles de production motrices, communes aux enfants du même âge, qui spécifient la manière de tracer les traits qui composent une figure. Les règles particulières de production concernant l'activité d'écriture émergeraient avec le début de son apprentissage, mais se mettraient en place progressivement, nécessitant un entraînement intensif avant de se stabiliser avec l'âge.

Les invariances cinématiques

Le premier invariant de l'écriture à avoir été mentionné est le *principe d'isochronie*, c'est à dire le maintien de la durée moyenne d'exécution malgré le changement de taille des lettres, pour un mouvement impliquant les mêmes effecteurs (Viviani, 1994; Viviani & McCollum, 1983). Toutefois, le degré d'isochronie serait dépendant de la vitesse globale du mouvement, plus le mouvement est rapide, plus le principe d'isochronie serait garanti. Dans ce sens, les recherches développementales mettent en avant une évolution du principe d'isochronie avec l'âge. Viviani et Schneider (1991) montrent, pour la production d'ellipses, une mise en place relativement précoce du principe d'isochronie, dès l'âge de 5 ans, puis une faible évolution jusqu'à l'âge de 12 ans, pour devenir optimal à l'âge adulte. Cependant, des données sont venues contredire l'augmentation du degré d'isochronie avec l'âge. Vinter et Mounoud (1991) posent l'hypothèse d'une évolution non monotone de l'isochronie. Les auteurs montrent, dans une tâche de production de cercles, une performance optimale au regard de l'isochronie à 5 ans (équivalente aux adultes) puis une diminution entre 5 et 7 ans, suivie d'une augmentation entre 7 et 9 ans. Les auteurs pensent que la baisse du degré d'isochronie serait due au fait que les enfants, à 7 ans, se focaliseraient sur la nécessité de produire une trace régulière et seraient dans l'obligation d'appliquer une stratégie de vitesse constante le long de la trajectoire pour contrôler leur mouvement.

D'autres chercheurs pensent que l'isochronie n'est pas un principe absolu. Dans certaines conditions, une augmentation de la taille des lettres peut s'accompagner d'une augmentation de la durée du mouvement (Wright, 1993; Zesiger, 1995). Dans son étude, Wright (1993) note, pour un mouvement d'écriture manuel, un accroissement de 7% de la durée de production pour une augmentation de taille de 115%. Par ailleurs, pour un mouvement impliquant l'épaule et le bras, il note une augmentation de 20% de la durée pour une augmentation de taille de 250%. Il n'y aurait alors qu'une compensation partielle de vitesse en réponse à l'augmentation de la taille. D'autre part, il a montré que les participants sont parfaitement capables de modifier la vitesse d'exécution en maintenant la taille constante. Ainsi, le principe d'isochronie pourrait être l'expression d'une tendance à modifier

le moins possible les paramètres de production pour un même mouvement impliquant les mêmes effecteurs (Zesiger, 1995), et ce principe pourrait être préservé dans une certaine limite de taille des lettres.

Outre le principe d'isochronie, le principe d'*homothétie temporelle* assure la conservation des rapports de durée d'exécution entre les traits d'une lettre, proportionnellement à la durée totale de production (Viviani, 1994). En d'autres termes, la durée relative de chaque trait constitutif d'une lettre est constante. Ce principe pourrait être le reflet d'un codage des paramètres de production sous la forme d'une séquence temporelle. Il faut noter que la stabilité de la structure temporelle serait sensible au niveau d'expertise des scripteurs ; l'homothétie temporelle croît avec l'âge (Zesiger, 1995). Toutefois, la notion d'homothétie temporelle a été remise en cause (Heuer & Schmidt, 1988; Teulings & Schomaker, 1993). Heuer et Schmitz (1988) ont testé le transfert de l'apprentissage d'un mouvement du coude au timing particulier, à l'exécution d'autres patterns au timing relatif différent. Si le programme moteur est effectivement codé en termes temporels alors le transfert à un nouveau mouvement, dont le timing relatif est différent, devrait être plus difficile que lorsque le timing est conservé. Les auteurs notent que quelque soit le transfert à effectuer, il est toujours rapide et aisé. Les auteurs concluent que la représentation motrice des patterns ne serait pas d'ordre temporel mais plutôt spatial. L'homothétie temporelle serait le reflet d'une gamme de préférences temporelles qui seraient dépendantes des caractéristiques spatiales du mouvement (forme, taille) et du membre impliqué (Teuling & Schomaker, 1993).

Il existe d'ailleurs une dernière caractéristique cinématique du mouvement d'écriture qui lie les paramètres temporels et spatiaux des formes. La *loi de puissance* $2/3$ ou $1/3$, qui lie la vitesse tangentielle d'exécution au rayon de courbure de la trajectoire (De'Sperati & Viviani, 1997; Lacquaniti, Terzuolo, & Viviani, 1983; Viviani & Terzuolo, 1982), propose que la vitesse de tracé diminue dans les parties courbes des lettres et augmente dans les parties planes. Cette tendance se manifesterait dès l'âge de 3 ans dans les mouvements simples, comme le dessin d'ellipses (Sciaky, Lacquaniti, Terzuolo, & Soechting, 1987). Lors de la production d'ellipses, Viviani & Schneider (1991) mettent en évidence un respect de la loi de covariation vitesse/courbure avec une augmentation quasi linéaire de la précision entre 5 et 12 ans, qui n'arrive tout de même pas au niveau de performance des adultes. Il semble cependant que cette loi, même si elle est un bon reflet de la covariation entre la vitesse et le rayon de courbure, pour la production de formes géométriques et de tracés simples, ne soit pas optimale pour les mouvements d'écriture plus complexes. Cette loi a d'ailleurs été rediscutée

plus récemment dans le cadre théorique du modèle *minimum jerk* (Richardson & Flash, 2002; Viviani & Flash, 1995). Ce modèle propose un mécanisme de contrôle qui contraint le mouvement de manière à ce que le trajet entre deux points dévie le moins possible d'une ligne droite et reste le plus lisse possible du point de vue cinématique. La loi de puissance $2/3$ serait l'expression de ce mécanisme de contrôle.

L'ensemble des recherches décrites supportent l'idée que les composantes temporelles du mouvement sont probablement des paramètres pris en compte à un niveau périphérique alors que les composantes spatiales seraient les paramètres encodés à un plus haut niveau, dans les programmes moteurs.

Les invariances spatiales

Le principe *d'équivalence motrice* recouvre le fait qu'une même lettre peut être produite avec des effecteurs différents (main droite, main gauche, coude, pied...), dans des contextes différents (supports, plans...), tout en conservant ses caractéristiques de forme. Les programmes moteurs seraient donc codés indépendamment des groupes musculaires impliqués et seraient de nature spatiale. Il a été démontré que lorsque les individus écrivent des lettres de tailles différentes (van Doorn & Keuss, 1993) et utilisent des effecteurs différents (Wright, 1993), la variabilité de la forme est très faible. Dans ce sens, Pick et Teulings (1983) ont montré que les scripteurs avaient des difficultés à modifier intentionnellement la taille des segments verticaux des lettres sans proportionnellement modifier la composante horizontale, et inversement. Cette forte dépendance des deux dimensions, qui a pour conséquence la préservation de la forme globale de la lettre, est interprétée comme la preuve de l'encodage dans les programmes moteurs des informations sur la taille relative des segments. C'est le principe d'*homothétie spatiale* qui assure la conservation des rapports de longueur entre les traits d'une lettre quelle que soit la variation de la taille globale de la lettre. Au niveau développemental, l'évolution de ce principe est discontinue (Zesiger, 1995). L'invariance spatiale augmente entre 8 et 9 ans, ce qui pourrait être due à une amélioration de la qualité de la représentation de la lettre. Entre 9 et 10 ans, une diminution de l'invariance est observée, ce qui pourrait être due à la recherche d'une plus grande vitesse d'exécution du mouvement. Cette perte de précision du tracé serait compensée dès l'âge de 11-12 ans.

La comparaison des résultats concernant les invariances spatiales et temporelles de l'écriture nous amène à admettre que les programmes moteurs sont définis au plus haut niveau par des paramètres spatiaux. Ecrire une lettre consisterait : à rappeler un programme moteur

spécifiant l'ordre et la séquence des traits afin de générer la forme ; à paramétrer la taille de la lettre, en termes de contrôle de la durée et de l'amplitude de la force musculaire ; à sélectionner les groupes musculaires à activer (Van Galen, 1991). Toutefois, comme nous l'avons vu, le degré d'invariance spatiale et temporelle du mouvement est dépendant de l'âge des scripteurs. La maîtrise des différents aspects de l'écriture ne serait possible que suite à un enseignement systématique et formel dispensé à des enfants dont le système moteur serait suffisamment mature.

2.1.2.2 Les habiletés motrices

L'instruction formelle de l'écriture débute en première année de primaire. Au fur et à mesure de l'apprentissage, des différences aussi bien quantitatives (vitesse) que qualitatives (lisibilité) vont apparaître. Cela s'explique évidemment par l'apprentissage en classe mais aussi par la maturation du système moteur qui devient, vers 6-7 ans, suffisante pour permettre à l'enfant d'exécuter des gestes fins et de contrôler son mouvement. Les observations de Lurçat (1974) vont dans ce sens. Elle a décrit l'évolution de la graphomotricité chez l'enfant âgé de 20 mois à 6 ans. Entre 20 et 24 mois, les mouvements seraient rapides, impulsifs. Ils impliqueraient essentiellement les articulations proximales et seraient de forte amplitude. C'est la période de la production des premiers tracés circulaires. Entre 2 et 3 ans, les articulations distales commencent à participer au tracé, entraînant une diminution de la taille des mouvements. Les boucles apparaissent. Puis, le mouvement se ralentit et le contrôle visuel du mouvement s'intensifie. Entre 3 et 4 ans, un répertoire des primitives graphiques, qui seront les éléments constitutifs des lettres, se développe et l'enfant commence à différencier le dessin et l'écriture. Entre 4 et 5 ans, l'enfant est capable de copier des lettres mais les erreurs sont nombreuses, des omissions, répétitions ou permutations de parties de lettres apparaissent. Entre 5 et 6 ans, les enfants associent la bonne trajectoire à la forme de la lettre bien que les lettres soient cabossées, souvent trop grandes et que le tracé reste incertain. Le mouvement serait à cette période essentiellement produit sous le contrôle de la vision et des informations kinesthésiques.

Coordination et intégration visuo-motrice

Dans un premier temps, une bonne coordination visuo-manuelle semble nécessaire pour apprendre à écrire. En général, pour évaluer la coordination visuo-manuelle, il est demandé aux enfants de surligner un patron graphique. La plupart des recherches trouve un lien néanmoins modéré entre cette compétence et le niveau d'écriture des enfants (Cornhill &

Case-Smith, 1996; Tseng & Murray, 1994). L'intégration visuo-motrice, qui demande davantage de compétences visuo-spatiales et graphomotrices, serait un meilleur prédicteur des performances en écriture des enfants en maternelle (Daly, Kelley, & Krauss, 2003; Weil & Amundson, 1994) et en primaire (Cornhill & Case-Smith, 1996; Kulp, 1999; Tseng & Murray, 1994). Le test développemental d'intégration visuo-motrice (VMI) qui consiste en la copie de figures géométriques de complexité croissante est le plus utilisé. Par exemple, Weil et Amundson (1994) ont montré que les enfants de maternelle, ayant réussi à copier correctement les figures du test, effectuent des copies de lettres (*SCRIPT : Scale of Children's Readiness in Printing*) plus lisibles que les enfants ayant échoué à plusieurs reprises lors du test. Cependant, Marr et Nishihara (1978) montrent que le test VMI n'explique que 10% de la variance des performances dans une tâche de copie de lettres et uniquement pour les filles.

Les compétences de motricité fine

La maîtrise de l'outil scripteur est une des difficultés que l'enfant doit aussi surmonter. Trois niveaux de tenue du crayon ont été décrits (Figure 13). L'enfant, dans un premier temps, saisit le crayon en l'enveloppant avec sa main entière (*tenue immature*), le poignet est raide ou légèrement fléchi et le mouvement du crayon est lié au mouvement du bras. La tenue évolue ensuite progressivement vers une saisie du crayon avec les doigts (*tenue intermédiaire*), mais les doigts restent tendus et serrent fort le crayon. A ce niveau, la main bouge un peu mais l'essentiel des mouvements du crayon est lié au mouvement de l'avant-bras. Enfin vers 7 ans apparaît une *tenue mature*, appelée *trépied dynamique* où le crayon est tenu sans être trop serré par la pointe des doigts, avec le pouce en opposition à l'index et le majeur en dessous du crayon. Le mouvement du crayon est alors lié au mouvement des doigts. Tseng et Cermak (1993) situent le développement du trépied dynamique entre 4 et 6 ans. Certains auteurs notent, pendant cette période, qu'une écriture lente et peu lisible est souvent le fait d'enfants qui obtiennent les moins bons scores de tenue de crayon (Burton & Dancisak, 2000; Schneck, 1991). Une fois le trépied dynamique établi, les enfants peuvent adapter leur saisie et des variations apparaissent. Les auteurs ne relèvent alors aucune modification de la rapidité et de la lisibilité de l'écriture, même pour les variations du trépied dynamique les plus atypiques (Dennis & Swinith, 2001; Koziatsek & Powell, 2003; Tseng & Cermak, 1993).

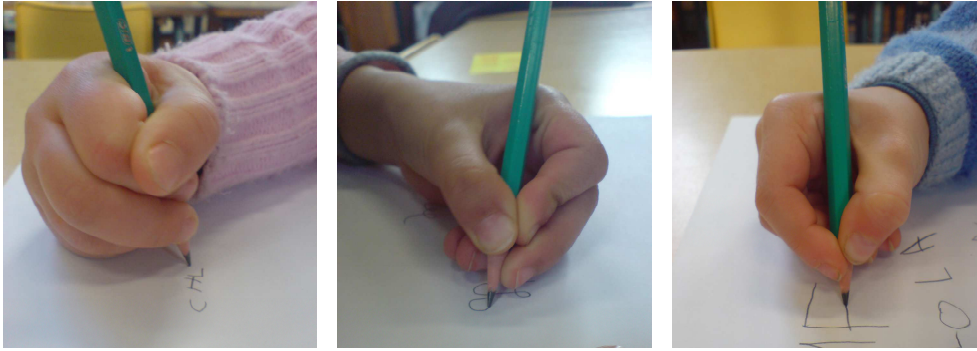


Figure 13. Exemples de tenue de crayon immature (à gauche), intermédiaire (au centre) et mature (à droite) chez des enfants de grande section de maternelle.

Les compétences motrices fines pourraient sous-tendre l'habileté à utiliser un crayon pour produire des traces écrites et avoir une influence sur la qualité et la vitesse de l'écriture. Un problème de coordination des mouvements des doigts pourrait provoquer des difficultés de contrôle du crayon qui seraient à l'origine d'une écriture lente, hésitante et peu lisible. Certains résultats mettent en évidence l'existence d'un lien entre les compétences motrices fines et la qualité de l'écriture. Ce sont les enfants ayant de faibles performances en écriture qui obtiennent également les moins bonnes performances dans des tâches de translation et de rotation d'objets de la main (Cornhill & Case-Smith, 1996), dans des épreuves de mouvements séquentiels des doigts (Berninger & Rutberg, (1992) et au test d'imitation de la position des doigts (*FiPIT*, Tseng et Cermak, 1993). Toutefois, ce ne sont pas tous les enfants en difficultés d'écriture qui manifesteraient des difficultés dans les tâches de motricité fine (Tseng & Chow, 2000). Graham, Berninger, Abbott, Abbott, et Whitaker (1997) trouvent que les habiletés motrices fines permettent de prédire les performances en écriture d'enfants du CP à la sixième, mais que leur contribution se ferait de manière indirecte via les capacités de codage orthographique. La capacité à encoder rapidement et automatiquement l'information visuelle des mots écrits aurait un effet plus direct sur l'écriture que les habiletés motrices fines. Les auteurs supposent cependant qu'il est possible que chez des enfants plus jeunes (4 ou 5 ans) la tendance soit inverse. L'écriture étant un acte linguistique et moteur, les compétences linguistiques peuvent jouer un rôle dans son apprentissage. Ainsi, le lien entre le codage orthographique et l'écriture serait important à tout âge, alors que le lien entre les compétences motrices et l'écriture serait plus important au début de l'apprentissage.

Les compétences kinesthésiques

Parmi les compétences qui sous-tendent la qualité et la vitesse de l'écriture, les habiletés kinesthésiques sont souvent citées. Schneck (1991) propose qu'une faiblesse des compétences proprio-kinesthésiques est à l'origine de la mauvaise tenue du crayon et des difficultés d'écriture des enfants considérés comme faibles scripteurs. Dans ce sens, la sensibilité kinesthésique est corrélée avec des fonctions motrices exigeant un contrôle gestuel fin mais également avec les mouvements nécessitant des coordinations corporelles plus globales (Bairstow & Laszlo, 1981). Laszlo et Bairstow (1983) pensent qu'une bonne sensibilité kinesthésique permet au scripteur d'être informé sur ses erreurs de production et également de créer une référence de l'acte moteur réalisé en vue d'une future répétition. Les habiletés kinesthésiques pourraient participer au contrôle du geste d'écriture mais aussi à la création des programmes moteurs. Dans ce cadre, il ne serait pas étonnant que des difficultés à percevoir et/ou stocker les informations kinesthésiques, entraînent des difficultés dans l'acquisition de l'écriture. Dans leur étude, les compétences kinesthésiques des participants étaient mesurées grâce à une tâche de jugement de la position et du déplacement passif de leur bras. Après un entraînement destiné à développer la sensibilité kinesthésique des enfants, les auteurs notent que leurs performances en écriture augmentent. Cornhill et Case-Smith (1996) ont également trouvé un lien entre kinesthésie et écriture. Cependant ces résultats n'ont pas été reproduits dans certaines recherches qui utilisent pourtant la même tâche de sensibilité kinesthésique (Lord & Hulme, 1987). L'ensemble des résultats ne permettent donc pas de conclure de manière catégorique sur l'existence et la nature du lien entre kinesthésie et écriture dans ce type d'études.

Ainsi, plusieurs facteurs liés aux habiletés motrices, visuo-motrices et linguistiques ont un impact sur l'écriture et son apprentissage. De ces habiletés dépend la construction d'une représentation motrice spatio-temporelle des lettres. L'écriture étant avant tout une activité linguistique, elle est logiquement en lien avec la lecture et son apprentissage. Nous allons aborder dans la partie suivante les interactions qui existent entre l'activité d'écriture et la perception visuelle des lettres, première étape de l'activité de lecture.

2.1.3 L'intervention des processus moteurs dans le traitement visuel des lettres

Nous pouvons considérer trois niveaux d'interaction entre la perception et la motricité, qui considèrent respectivement le rôle dans la perception, de la préparation et de l'exécution du mouvement, ainsi que des connaissances motrices (Viviani & Stucchi, 1992). Au plus bas niveau, le système moteur coopère avec les différents systèmes sensoriels pour rendre possible la perception. La plupart des entrées sensorielles s'accompagnent en effet d'une activité motrice qui permet d'orienter les organes sensoriels vers la source de la stimulation. La qualité des perceptions dépend alors de la qualité des mouvements d'exploration et de la synthèse des différentes informations recueillies séquentiellement. Au « *niveau de l'attente* », les interactions perceptivo-motrices apparaissent dans un contexte où une action est au moins préparée, à défaut d'être exécutée. Les commandes motrices destinées aux muscles seraient accompagnées d'une copie d'efférence qui permettrait d'anticiper les conséquences sensorielles de l'action. Les attentes générées auraient une influence sur la perception des modifications produites dans l'environnement par l'action des personnes. Enfin, il existe un niveau « plus abstrait » dans lequel une information motrice pertinente est rendue disponible alors même qu'aucun mouvement n'est exécuté ni préparé. Ce ne sont plus les mouvements réels qui interviennent dans la perception mais la connaissance que nous avons de ces mouvements. Les connaissances motrices interviendraient dans l'organisation des perceptions visuelles, plus particulièrement, elles influenceraient la perception d'un stimulus en mouvement et la perception spatiale statique. Dans le cadre des interactions entre lecture et écriture, nous nous intéresserons à ce dernier niveau de la relation perceptivo-motrice. Après un rapide survol de l'influence de la motricité sur la perception des mouvements d'écriture, nous nous intéresserons plus particulièrement à son influence sur la perception spatiale de lettres statiques.

2.1.3.1 La perception visuelle des mouvements d'écriture

La majorité des données obtenues dans le champ de la perception visuelle des mouvements d'écriture montre que le système visuel est extrêmement sensible aux règles de production motrice. Un mouvement est jugé comme « correct » lorsqu'il respecte les principes de production motrice (voir Meary, Chary, Palluel, & Orliaguet, (2005) ; Bidet-Ildei, Méary, & Orliaguet, 2006, pour l'isochronie ; voir Viviani & Stucchi, 1989, 1992, pour la loi de puissance $2/3$). Plus encore, le système visuel se servirait du fonctionnement moteur comme d'un référentiel pour reconnaître les mouvements mais aussi pour anticiper l'identité

des mouvements qui ne sont pas encore réalisés (Kandel, Orliaguet, & Viviani, 2000; Orliaguet, Kandel, & Boë, 1997). La reconnaissance d'un mouvement humain résulterait donc d'une interaction entre les systèmes visuel et moteur. Cette hypothèse est étayée par Jeannerod (2001) qui montre que la perception d'un événement dynamique déclenche également l'activation du réseau neuronal impliqué dans la motricité. Toutefois, les interactions perceptivo-motrices semblent dépendre en partie des compétences motrices des participants (Bidet-Ildei, Méary, & Orliaguet, 2006).

2.1.3.2 La perception des lettres statiques

Les données comportementales

Une série de données indique que nos connaissances motrices interviendraient également dans la perception de tracés manuscrits. Il nous serait possible d'inférer les règles de production mises en jeu par le scripteur à partir de la connaissance de nos propres mouvements et ceci favoriserait la reconnaissance des caractères manuscrits.

Dans une première étude de Freyd (1983), les participants devaient apprendre des caractères artificiels qui pouvaient être écrits de deux manières différentes ; le dernier trait du caractère était tracé vers le haut ou vers le bas (Figure 14). Pendant une phase d'entraînement, les participants devaient associer chaque symbole avec un chiffre. Ils regardaient un écran sur lequel les caractères se traçaient au fur et à mesure (trait par trait) selon l'une des deux méthodes de production. Cette première phase s'achevait lorsque les participants étaient capables d'associer correctement chaque caractère à son chiffre. Après l'entraînement, un caractère statique et un chiffre étaient présentés ; les participants devaient déterminer, le plus rapidement possible, si le caractère présenté correspondait ou non au chiffre qui lui était associé. Il était précisé aux participants que les caractères pouvaient avoir subi de légères modifications de formes mais que celles-ci n'entravaient pas la reconnaissance. Il est important de noter que les distorsions étaient en adéquation avec l'une ou l'autre des méthodes de production (Figure 14). Les résultats montrent que les participants reconnaissaient plus rapidement les caractères dont les distorsions sont compatibles avec la méthode de traçage apprise. D'après Freyd, l'observateur serait sensible aux variations, dans la trace manuscrite statique, qui indiquent la manière dont un caractère a été produit (grammaire de l'action).

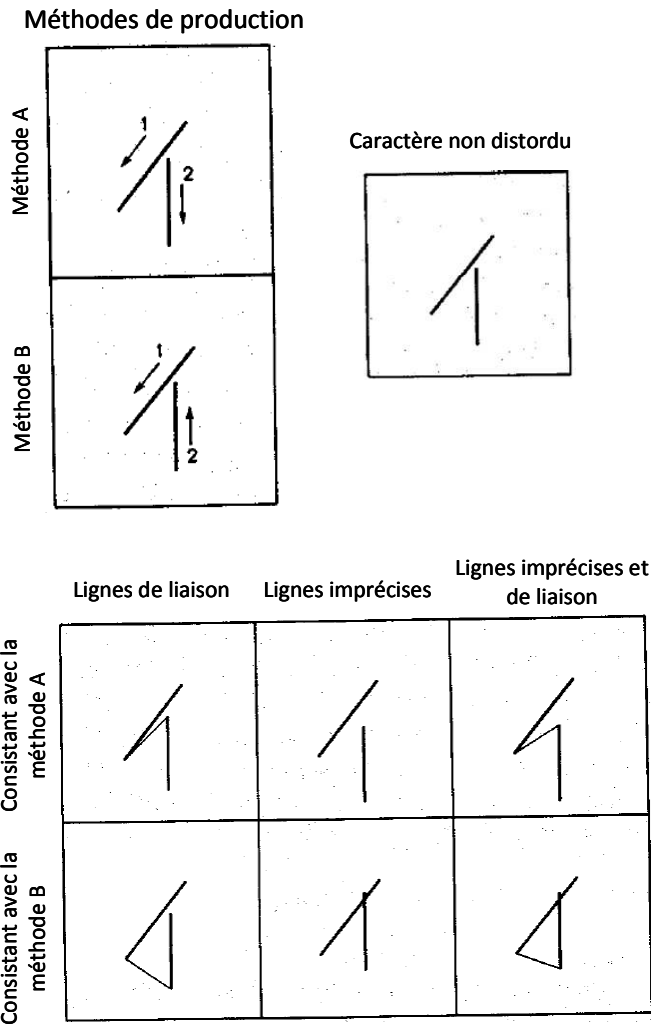


Figure 14. Les deux méthodes de production, le caractère non distordu et les six distorsions utilisées dans la phase test pour un exemple de caractère. Les flèches indiquent le sens de production et les nombres, l'ordre de production [adapté de Freyd, 1983].

Dans une seconde étude, Babcock et Freyd (1988) proposent cette fois aux participants d'apprendre des caractères manuscrits, présentés statiquement, en les associant avec des chiffres. Dans la phase test, la première épreuve consistait à tracer sous les nombres qui étaient proposés les caractères correspondants. L'expérimentateur notait l'ordre de production des traits pour chaque caractère (détection implicite). La seconde épreuve consistait à deviner l'ordre d'exécution des caractères originaux (détection explicite). Les résultats montrent que les participants sont capables de se servir des informations contenues dans les légères déformations des caractères appris (par exemple le chevauchement de traits) pour discriminer le bon ordre de production des traits ou le sens de production d'un même trait. Les auteurs concluent que l'observateur est capable d'extraire, à partir d'une trace statique non familière, le processus de production sous-jacent.

La capacité à extraire le mouvement des traces statiques a également été étudiée lors d'expériences portant sur la reconnaissance d'idéogrammes chinois (Flores d'Arcais, 1994). Les idéogrammes chinois ou japonais sont des signes complexes (jusqu'à 23 traits différents) spécifiquement associés aux mouvements qui permettent de les former ; les traits qui les composent doivent être écrits dans un ordre précis et codifié. Pour se remémorer les signes et trouver leur signification, un moyen mnémotechnique classiquement utilisé est l'écriture avec le doigt dans l'air. Cette stratégie est particulièrement observée chez les jeunes enfants qui apprennent de nouveaux idéogrammes. Flores d'Arcais (1994) a mis en évidence que l'ordre et le sens dans lequel ont été produits les premiers traits constituent des indices très efficaces pour trouver rapidement la signification d'idéogrammes présentés visuellement. De plus, les caractères qui partagent les mêmes premiers traits sont plus fréquemment confondus que les autres caractères. Enfin, si l'ordre d'exécution des traits de l'idéogramme est modifié, les temps d'identification augmentent. Ainsi, la forme de l'idéogramme, mais également l'ordre d'exécution de ses traits seraient mémorisés. Les effets observés sur le traitement visuel des caractères dépendent donc de la manière dont ceux-ci sont écrits.

Freyd (1987) présume toutefois que des informations dynamiques, autres que l'ordre et la direction de production des lettres, pourraient participer à la perception visuelle de tracés statiques. Elle insiste fortement sur l'importance des informations dynamiques dans les représentations mentales. Ainsi, nous serions capables de reconnaître facilement et rapidement des traces graphiques manuscrites notamment parce que nous sommes capables de produire de tels tracés.

Les données neuropsychologiques

Seki, Yajima et Sugishita (1995) ont évalué, chez deux patients alexiques⁹, les effets d'une méthode de remédiation basée sur le principe de « *lecture kinesthésique* ». Cette dernière consiste à lire les caractères en traçant ou copiant leurs contours avec le doigt. La lecture kinesthésique s'est révélée efficace pour les deux patients. D'une part, les patients étaient capables de reconnaître les lettres en les traçant alors qu'ils ne pouvaient plus les identifier uniquement visuellement. D'autre part, ils étaient finalement capables de lire des caractères (rééduqués) et des mots simples sans nécessairement devoir toujours les associer au mouvement. Bartolomeo, Bachoud-Lévi, Chokron et Degos (2002) ont également utilisé la

⁹ Pour rappel, ces patients, comme la plupart des patients alexiques, présentent des troubles importants de la lecture (lecture lente, lettre à lettre) et de l'identification des lettres, alors que l'écriture est préservée.

méthode de lecture kinesthésique chez un patient alexique présentant des déficits d'imagerie visuelle de lettres. Le patient manifestait de grandes difficultés en lecture de lettres et de mots (lecture extrêmement lente). De plus, il était presque totalement incapable d'évoquer mentalement la forme d'une lettre (d'autres catégories de stimuli, comme les visages ou les objets, étaient préservées). Cependant, lorsque le participant pouvait tracer la lettre avec son doigt sur la table, les performances étaient améliorées. Cette étude de cas apporte de nouvelles informations par rapport à la recherche précédente. Le profil du patient, la présence de troubles de l'imagerie mentale des lettres alors que les capacités motrices sont préservées, est compatible avec l'hypothèse d'une perturbation spécifique des représentations visuelles des lettres. La facilitation kinesthésique observée irait alors dans le sens d'un double codage visuel et moteur des lettres. A partir d'un tableau clinique différent, Mycroft, *et al.* (2002) arrivent à une conclusion similaire. Leur patiente était absolument incapable de dénommer une lettre présentée visuellement, bien que son imagerie visuelle soit préservée. Cependant, le nom de la lettre était systématiquement retrouvé lorsque la patiente était guidée pour la tracer. Ainsi, l'identité de la lettre serait retrouvée en mémoire grâce à l'évocation du programme moteur correspondant. Ces deux recherches prouveraient que dans le cas d'une perturbation des représentations visuelles, les représentations motrices pourraient être utilisées pour accéder à la forme visuelle des lettres et à leur identité.

D'un autre côté et de manière intéressante, Anderson, Damasio, et Damasio (1990) ont montré que lorsque les représentations motrices sont désorganisées, la reconnaissance visuelle des lettres peut être perturbée. Leur patiente présentait une alexie associée à une agraphie comparable. Elle était incapable d'écrire des mots et des lettres reconnaissables (les lettres étant spatialement désorganisées), mais restait cependant capable d'écrire des chiffres et d'exécuter facilement des calculs. De plus, l'identification de lettres et la lecture de mots étaient impossibles, mais la lecture de chiffres et de symboles non verbaux était préservée. La particularité de ce cas clinique tient en la localisation de la lésion conduisant à cet ensemble de troubles. La lésion, typique de l'agraphisme, se trouvait dans le cortex prémoteur gauche, dans l'aire d'*Exner* considérée comme l'aire de l'écriture (Roux et al., 2009). Les données anatomo-fonctionnelles montrent que la destruction d'une aire cérébrale (exérèse d'une tumeur) impliquée dans les mouvements d'écriture peut conduire à une perturbation générale des représentations des lettres. Il semblerait que pour reconnaître correctement les lettres à partir d'une entrée motrice et/ou visuelle, les représentations motrices des lettres doivent être intègres.

Les données d'imagerie cérébrale

Les études en imagerie cérébrale permettent d'étudier les réseaux neuronaux qui sous-tendent les interactions entre perception visuelle des lettres et écriture. Il s'agit essentiellement de vérifier si des aires sensorimotrices s'activent pendant l'observation de lettres en dehors de tout mouvement. Que ce soit chez des adultes japonais ou français (droitier ou gaucher), des activations du *cortex prémoteur (PM)* contralatéral à la dominance manuelle et plus largement du réseau moteur (*sillon intrapariétal, IPS* et *aire motrice pré-supplémentaire, pré-AMS*) sont observées dans des tâches de perception visuelle de lettres alors qu'aucune réponse motrice n'était requise (pour les Kanji, Kato et al., 1999, et pour les lettres latines, Longcamp, Anton, Roth, & Velay 2003). Il s'agirait bien des circuits spécifiques impliqués dans l'écriture des lettres qui seraient automatiquement sollicités dans le traitement perceptif des lettres présentées de manière statique.

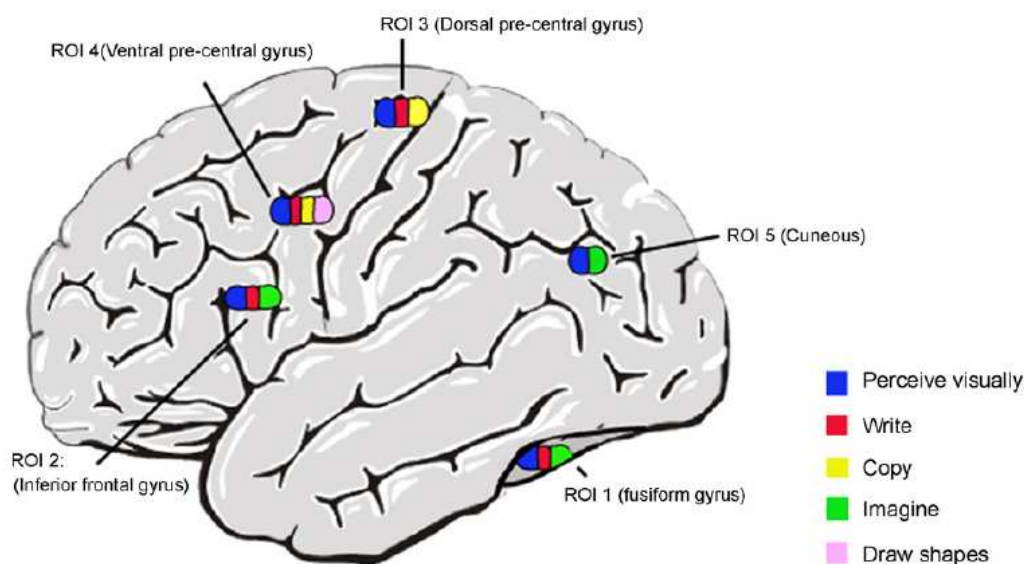


Figure 15. Schématisation des résultats obtenus dans l'expérience de James et Gauthier (2006) montrant les différents réseaux multimodaux impliqués dans le processus de traitement des lettres [repris de James et Gauthier, 2006].

James et ses collaborateurs (James & Atwood, 2009; James & Gauthier, 2006) ont confirmé ces résultats en montrant également que la perception visuelle passive de lettres provoque une activation des régions motrices impliquées dans l'écriture de ces mêmes caractères. Dans leur expérience de 2006, les auteurs vont plus loin en proposant une variété de tâches impliquant le traitement de lettres. Ils proposent notamment aux participants des tâches d'imageries sur les lettres (imaginer la première lettre d'une forme présentée visuellement), de copie de lettre ou d'écriture de mémoire (écrire la première lettre de la

forme présentée). Ils montrent qu'il existe diverses combinaisons d'aires impliquées dans le traitement des lettres en fonction de la tâche proposée (Figure 15). Ils révèlent, par exemple, qu'écrire sans voir active les régions spécifiques à la perception des lettres (voir James, 2010 pour une étude chez les enfants). D'après les auteurs, une telle intégration au sein du système sensoriel résulterait de notre expérience multimodale (écrire/voir/entendre) intense avec les lettres.

2.2 Les modèles de la lecture experte et de son apprentissage

Les modèles de la lecture et de son apprentissage envisagent tous la reconnaissance des mots écrits comme le résultat de l'activation de trois codes essentiels des mots: un code orthographique (identité des lettres et leurs combinaisons), un code phonologique (identité des phonèmes et leurs combinaisons) et un code sémantique (connaissances conceptuelles nécessaires à la compréhension des mots) (Sprenger-Charolles & Colé, 2003/2006). Au cours de cette présentation, nous allons nous intéresser à la place du traitement des lettres dans ces modèles et à celle des compétences précoces liées au langage oral et écrit.

2.2.1 La lecture experte

Deux grandes approches théoriques de la lecture experte peuvent être distinguées. D'une part, les modèles double-voie qui ont exercé une influence majeure dans le domaine de la lecture, notamment dans les recherches sur son apprentissage. Cette approche est encore largement utilisée dans l'évaluation cognitive de l'apprentissage et des déficits de la lecture (Sprenger-Charolles, Colé, Béchennec, & Kipffer-Piquard, 2005). D'autre part, les modèles connexionnistes qui deviennent de plus en plus influents dans le domaine de la compréhension des mécanismes cognitifs de la lecture. Ces deux catégories de modèles se distinguent respectivement par leur approche fonctionnelle qui met l'accent sur les processus de traitement des connaissances et sur l'organisation architecturale de stockage des connaissances pendant l'activité de lecture.

2.2.1.1 Les modèles double-voie

Les modèles double-voie (pour les développements les plus récents voir, Coltheart, Curtis, Atkins, & Haller, 1993; Coltheart, Rastle, Perry, Langdon, & Ziegler, 2001; Diependaele, Ziegler, & Grainger, 2010) postulent que le lecteur expert a à disposition deux procédures différentes pour transcrire le langage écrit en langage oral. La *voie lexicale* (ou

directe) permet l'accès à un lexique mental contenant les mots familiers et déjà rencontrés. Le stimulus est apparié directement à l'entrée lexicale correspondante qui permet de retrouver sa prononciation. Evidemment, le lecteur est capable de lire des suites de lettres prononçables qu'il n'a jamais rencontrées auparavant. Ainsi, les modèles double voie proposent que le lecteur doit également avoir à sa disposition une *voie non lexicale* (ou indirecte) qui fonctionne à l'aide de règles de conversion graphème-phonème et qui permet le décodage des mots nouveaux et des pseudo-mots ; cette voie fournit des correspondances incorrectes pour les mots irréguliers qui n'obéissent pas aux règles de conversion. Dans les dernières versions implémentées des modèles double-voie (Coltheart et al., 2001 ; Diependaele et al., 2010), la présentation d'un mot déclenche l'activation de détecteurs de traits qui activent les détecteurs de lettres. Les deux voies, lexicale et non lexicale, sont simultanément activées par les détecteurs de lettres et opèrent quasiment en parallèle. Chez le lecteur expert, la voie lexicale est en théorie plus rapide et plus automatisée que la voie non lexicale. Pour la première les lettres seraient traitées en parallèle, alors que pour la seconde le traitement serait sériel.

2.2.1.2 Les modèles connexionnistes

Les modèles connexionnistes de type *PDP* (*Parallel Distributed Processing*) proposent qu'une procédure unique de lecture associant les codes orthographiques, phonologiques et sémantiques, permettrait de lire tous les types de mots. Dans les modèles connexionnistes de Seidenberg et McClelland (1989) (Behrmann, et al., 1998; Seidenberg & McClelland, 1989), les mots ne sont pas représentés dans un lexique mental et les connaissances langagières qui sous-tendent la lecture ne sont pas stockées sous forme de règles comme dans les modèles double-voie (Figure 16). Les activités cognitives sont conçues comme le résultat d'un calcul parallèle et distribué sur l'ensemble d'un réseau d'unités de traitement totalement interconnectées. Le réseau comprend trois séries d'unités qui codent soit l'information orthographique, phonologique ou sémantique et qui sont reliées entre elles par trois couches d'unités cachées. Lorsqu'un mot est présenté au réseau, les unités interagissent jusqu'à ce qu'un patron d'activation stable (ou *attracteur*), qui correspond à l'interprétation du mot, soit généré. Les règles émergent progressivement à partir de l'extraction de régularités statistiques entre les structures orthographique et phonologique des mots présentés et les mots nouveaux sont prononcés par un processus de généralisation à partir de ces régularités. Par ailleurs, Rumelhart et McClelland (1982) proposent que le traitement des mots commence par la détection des traits caractéristiques des lettres. La perception des lettres serait parallèle et plusieurs lettres du mot (environ 4 lettres) pourraient être traitées à la fois. Il

est également postulé que l'identification d'une lettre dans la chaîne de caractères est fonction de sa position relative par rapport aux lettres voisines. Cet effet suggère une représentation, implicite ou explicite, des ensembles de lettres et de leur distribution statistique dans les mots.

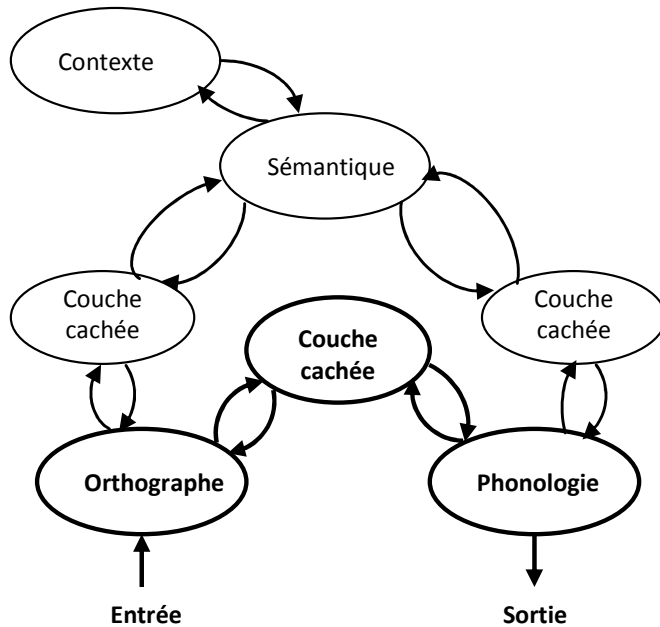


Figure 16. Schématisation générale de l'architecture du réseau connexionniste de reconnaissance et dénomination des mots. Le modèle implémenté est représenté en gras. [adaptée de Seidenberg et McClelland, 1989]

2.2.1.3 Le modèle de détecteurs de combinaisons locales (LCD)

Le modèle LCD (Dehaene, Cohen, Sigman, & Vinckier, 2005) met l'accent sur les processus visuels dans le traitement de la reconnaissance des mots, souvent négligés dans les modèles cognitifs traditionnels, et met en correspondance les différentes étapes du traitement avec les substrats corticaux qui leur sont associés (Figure 17). Dehaene et ses collaborateurs proposent que les mots soient encodés selon une hiérarchie postéro-antérieure de neurones spécialisés pour traiter des fragments de mots de plus en plus larges et complexes, de la détection de traits à celle de petites combinaisons locales de lettres, les « bigrammes » (voir Peressotti & Grainger, 1999).

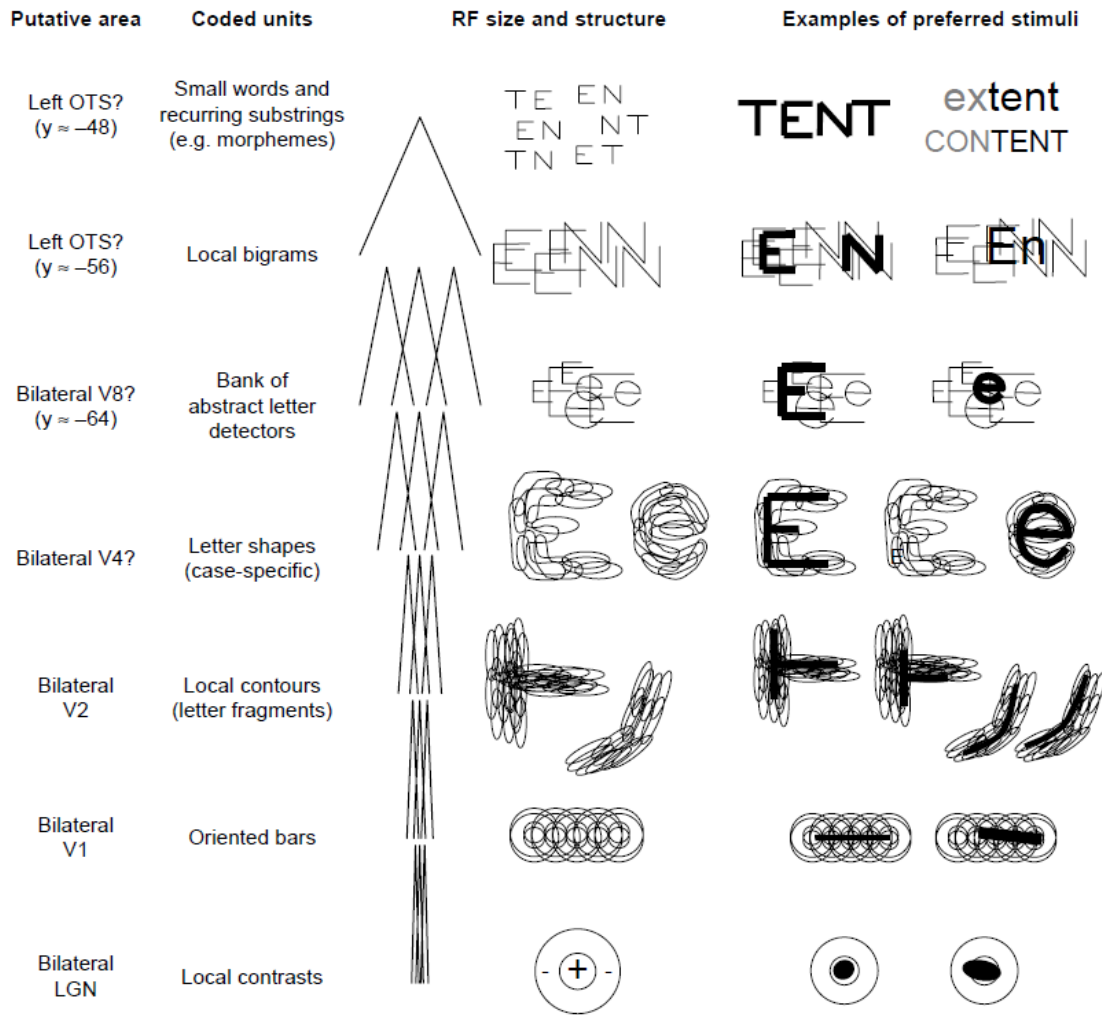


Figure 17. Représentation schématique du modèle de reconnaissance de mots à l'aide de détecteurs de combinaisons locales (modèle LCD) organisés de façon hiérarchique. Au niveau le plus bas, le système détecte les combinaisons locales d'orientation, et permet la détection de traits. A l'étape suivante, les traits sont utilisés de façon à former les contours locaux et détecter une forme de lettre. A ce niveau la lettre détectée correspond à une casse particulière. Le stade suivant permet d'identifier la lettre à un niveau plus abstrait. Les « détecteurs de lettres » peuvent coder les différentes versions d'une même lettre. Au niveau suivant les combinaisons locales de lettres sont traitées ; les neurones « bigrammes » sont sollicités. Enfin, la dernière étape consiste à traiter les combinaisons de bigrammes. Les neurones impliqués commenceraient à réagir aux morphèmes ou aux petits mots et bigrammes au sein des mots [repris de Dehaene et al., 2005].

Ce modèle serait localisé au niveau de la « *visual word form area* » (VWFA). Cette région, localisée dans le cortex occipito-temporal ventral gauche dans une portion du gyrus fusiforme, a été isolée suite à des études en neuro-imagerie et aux observations neuropsychologiques de patients présentant des alexies pures ; elle est considérée comme l'aire du traitement des représentations pré-lexicales de lettres dans les mots et les pseudo-mots (Cohen et al., 2000; Cohen et al., 2002; McCandliss, Cohen, & Dehaene, 2003; pour des revues voir Schlaggar & McCandliss, 2007). Toutefois, l'existence de cette aire est encore discutée (Price & Devlin, 2003, 2004). Enfin, il faut signaler que la VWFA se spécialiserait

au cours de l'apprentissage de la lecture et deviendrait plus sensible au traitement des mots avec l'augmentation de l'expertise en lecture (McCandliss, et al., 2003). Par exemple, Sandak *et al.* (2004) montrent que l'augmentation de l'activité dans la région ventrale occipito-temporale gauche corrèle plus fortement avec les compétences en lecture qu'avec l'âge. Shaywitz *et al.* (2004) montrent que les enfants dyslexiques ayant reçu une rééducation, améliorent leurs performances en lecture et que celles-ci s'accompagnent d'une augmentation de l'activité corticale au niveau de la VWFA.

2.2.2 L'apprentissage de la lecture

2.2.2.1 Les modèles à « étapes »

Les premiers modèles de l'apprentissage de la lecture n'étaient pas aussi élaborés que ceux proposés pour la lecture experte et consistaient principalement à décrire les grandes étapes du développement de la lecture. Parmi ces modèles développementaux, le plus connus est celui de Frith (1985) qui propose trois stades : le stade logographique, le stade alphabétique et le stade orthographique. Pour chacun d'entre eux, le lecteur débutant adopterait une procédure spécifique de traitement des mots. Dans ce modèle, les étapes, toutes obligatoires, se succèderaient dans un ordre imposé. La procédure logographique permet la reconnaissance immédiate de mots familiers. Pour ce faire, l'enfant aurait recours aux traits visuels saillants des mots. Le traitement ne serait pas de nature linguistique, les lettres seraient largement ignorées et les indices phonologiques entièrement secondaires. La procédure alphabétique permet aux enfants de prononcer (pas forcément de manière correcte) des mots nouveaux et pseudo-mots. Cette procédure repose sur la connaissance et l'utilisation des correspondances graphème-phonème et implique un décodage systématique graphème par graphème. Pendant la phase alphabétique, l'enfant se sert de sa connaissance des lettres et de ses habiletés de manipulation des sons de la parole pour commencer à traiter les relations entre les lettres et les sons. Ainsi, il acquiert progressivement les correspondances entre les unités phonologiques et orthographiques et pourraient commencer à lire les mots (Ehri, 1995). Enfin, la procédure orthographique, permet une reconnaissance directe des mots, sans recours à la conversion grapho-phonologique. L'enfant utiliserait des informations orthographiques spécifiques, les morphèmes, qui seraient traitées séquentiellement et systématiquement.

Une des limites importantes de ces modèles provient du fait que des procédures de traitements particulières des mots écrits doivent se succéder séquentiellement au cours du développement. Or, les résultats expérimentaux ne permettent pas de mettre en évidence une

stricte succession entre les étapes développementales (Sprenger-Charolles & Bonnet, 1996). De plus, l'étape logographique ne serait pas obligatoire. Son utilisation dépendrait de l'opacité de la langue (Sprenger-Charolles & Bonnet, 1996) ou encore du type de mots. On peut également se demander si l'étape logographique doit être considérée comme un stade de développement de la lecture en raison de sa nature extralinguistique. Enfin, ces modèles restent imprécis quant à la cause du passage d'une stratégie à une autre et sur leur coexistence possible.

Toutefois, le principal avantage du modèle de Frith (1985) est de considérer l'apprentissage de la lecture et de l'écriture comme des acquisitions qui s'effectueraient en parallèle et s'influenceraient mutuellement en provoquant alternativement l'adoption de nouvelles stratégies (Figure 18). Frith propose donc que des transferts de procédures existent entre les deux habiletés. Par exemple, l'enfant adopterait en premier la procédure alphabétique en écriture à cause du traitement séquentiel des mots lors de la production écrite avant de pouvoir l'utiliser en lecture. Inversement, le niveau orthographique est d'abord utilisé en lecture avant de pouvoir guider l'écriture. Il faut également noter que c'est seulement lorsqu'un certain niveau d'expertise (au nombre de 3) est atteint, pour l'une ou l'autre des habiletés, que la stratégie peut être utilisée par la seconde habileté.

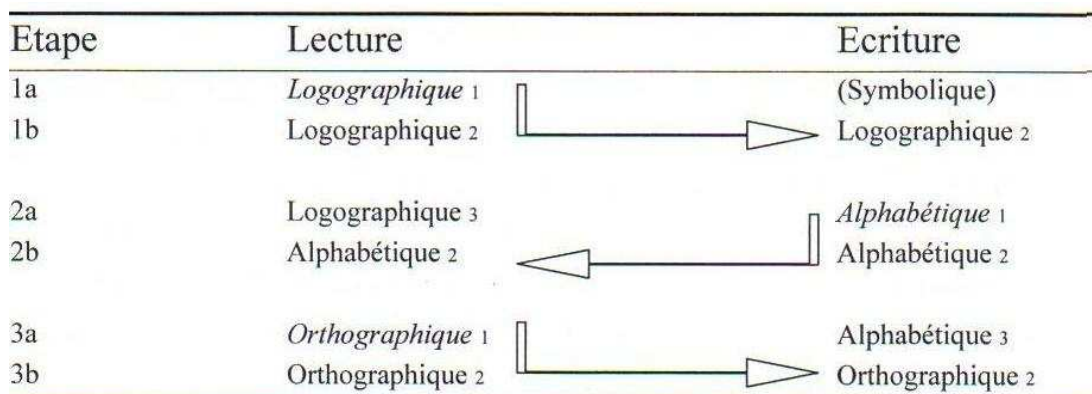


Figure 18. Schématisation du modèle de l'acquisition des habiletés de lecture et d'écriture. Chacun des trois stades (logographique, alphabétique et orthographique) est divisé en deux étapes (a et b) avec l'une ou l'autre habileté qui « arbitre » la stratégie (cf. flèches). Les nombres en indices représentent le niveau de l'habileté [adapté de Frith, 1985].

2.2.2.2 Les modèles analogiques

Les modèles développementaux plus récents sont davantage interactifs et supposent que l'enfant dispose des différentes procédures dès le début de l'apprentissage. En particulier, l'accent a été mis sur l'interaction précoce des compétences phonologiques et orthographiques

même si elles ne sont pas totalement développées. Parmi ces modèles, les modèles analogiques proposent l'utilisation d'une seule procédure de traitement (analogique) pour identifier tous les types de mots. Le traitement analogique correspond au fait que l'enfant peut utiliser ses connaissances orthographiques et phonologiques sur un mot connu afin d'identifier un mot nouveau. Dans ces modèles, c'est le type de connaissances sur les liens orthographe-phonologie qui évoluerait qualitativement et quantitativement avec l'apprentissage. Dans le modèle interactif analogique de Goswami (1993), avant l'apprentissage formel de la lecture, l'enfant peut établir des correspondances entre les rimes à l'oral et des séquences orthographiques à l'écrit. Cette procédure de lecture par analogie, développée précocement par l'enfant, pourrait être utilisée uniquement si l'enfant est capable de segmenter ces unités intrasyllabiques. Le rôle de la capacité à segmenter les phonèmes interviendrait plus tard. L'enfant va ainsi se constituer un petit lexique orthographique composé de mots dont il peut identifier les rimes ; en retour, ce lexique facilite la lecture de mots qui n'ont jamais été rencontrés mais qui sont orthographiquement proches des mots connus. Puis, sous l'influence de l'enseignement de la lecture et de l'écriture, l'enfant développe ses compétences phonologiques et prend notamment conscience de l'existence des phonèmes. L'enfant peut alors établir de nouvelles correspondances entre les graphèmes et les phonèmes et multiplier le nombre d'analogies possibles pour identifier les mots nouveaux. La procédure de lecture qui découle de cette habileté de segmentation phonémique consiste en l'application des règles de conversion grapho-phonémique.

Toutefois, plusieurs recherches concluent en faveur d'une évolution inverse des stratégies de lecture. L'utilisation de la procédure de lecture par analogie serait tardive alors que l'utilisation de la procédure de lecture par conversion grapho-phonémique serait précoce (Wimmer, Landerl, Linortner, & Hummer, 1991; Wimmer, Landerl, & Schneider, 1994). Cependant, selon Ziegler et Goswami (2005), la difficulté majeure de l'apprentissage de la lecture réside dans le fait que la phonologie favorise des unités larges (rimes et syllabes) alors que l'orthographe favorise de petites unités (graphèmes). Il existerait alors des différences d'utilisation des stratégies de lecture en fonction de la nature des systèmes orthographiques. Dans les systèmes orthographiques consistants, les enfants utiliseraient les correspondances graphème-phonème comme stratégie de lecture puisque le lien entre les deux types d'unité est consistant. Dans les systèmes orthographiques inconsistants, les enfants utiliseraient des stratégies de recodage phonologique variées (sur les phonèmes et les rimes) et développeraient donc ces stratégies en parallèle.

Enfin, Goswami et Bryant (1990) proposent également l'existence d'un lien entre apprentissage de la lecture et de l'écriture. Les activités d'écriture développeraient des habiletés qui influenceraient l'apprentissage de la lecture, et inversement.

2.2.2.3 Les modèles double-voie

Bien que les modèles double-voie, abordés précédemment, reflètent l'état final d'un système ayant appris à lire, ils offrent toutefois un cadre intéressant pour expliquer l'apprentissage de la lecture et ses déficits (Sprenger-Charolles, 2005; Sprenger-Charolles, et al., 2005). Pour parvenir à développer les procédures de lecture décrites dans ces modèles de lecture experte (non lexicale et lexicale), l'apprenti-lecteur doit d'abord comprendre le principe alphabétique et développer sa connaissance des correspondances graphème-phonème. Au début de l'apprentissage, l'apprenti lecteur a recours à la procédure non lexicale où il applique les correspondances qu'il a apprises. L'utilisation répétée de la voie non lexicale permet de créer des correspondances fortes entre unités orthographiques et phonologiques puis de les renforcer en fonction de la fréquence de ces correspondances et de la fréquence des mots à l'écrit. Progressivement, la procédure lexicale se met en place. Son établissement est lié à l'élaboration d'un lexique orthographique mais ce dernier dépendrait, au moins en partie, du fonctionnement de la procédure non lexicale. Plusieurs études font apparaître que la procédure phonologique facilite la mise en place du lexique orthographique. En effet, certains auteurs montrent que les performances en décodage phonologique sont prédictives des capacités ultérieures en lecture, y compris pour les mots irréguliers. En revanche, les performances en lecture de mots irréguliers ne permettent pas de prédire les capacités de lecture des mots irréguliers et des pseudo-mots (Sprenger-Charolles, Siegel, & Bonnet, 1998). Share (1999) montre que le décodage (et donc la procédure non lexicale) de mots nouveaux agit comme un mécanisme d'auto-apprentissage pour l'élaboration des représentations orthographiques de ces mots et donc à l'établissement de la procédure lexicale qui les utilise.

2.2.2.4 Les modèles connexionnistes

La conception dynamique de l'apprentissage est particulièrement bien représentée dans les modèles connexionnistes. Le réseau apprend à « lire » en mettant en relation l'orthographe des mots et leur phonologie à partir d'un corpus d'entraînement de mots. Les connexions du réseau sont modifiées (algorithme de rétro-propagation de l'erreur) afin de diminuer en cas d'erreur, l'écart entre la réponse donnée par le réseau et la réponse attendue. Le modèle connexionniste de Harm et Seidenberg (1999), qui constitue une extension des

modèles de Seidenberg et McClelland (1989) et Plaut, McClelland, Seidenberg, et Patterson (1996), permet de rendre plus particulièrement compte des débuts de l'apprentissage de la lecture de mots monosyllabique. Dans ce nouveau modèle, les auteurs ont accordé une place particulière aux compétences phonologiques des enfants. Ils ont intégré au réseau, un modèle représentant l'acquisition des compétences phonologiques antérieures à l'apprentissage de la lecture. Le réseau utilisé pour simuler l'apprentissage de la lecture se compose classiquement d'une couche d'unités orthographiques et d'une couche d'unités phonologiques reliées par une couche d'unités cachées. La couche phonologique est également reliée à une seconde couche d'unités cachées, appelées « *clean-up* », avec laquelle elle forme le composant phonologique. Quand le système est exposé à des formes phonologiques, il génère des attracteurs phonologiques qui prennent en considération les principales sources de variation de la structure phonologique des mots, comme la position des phonèmes dans les mots et le contexte vocalique. Cet apprentissage permet au composant phonologique d'acquérir une certaine connaissance des caractéristiques phonologiques de la langue.

Dans un second temps, les auteurs ont simulé l'apprentissage de la lecture. Les résultats montrent que le réseau entraîné est capable de lire 98% des mots présentés et que les erreurs portent sur des mots irréguliers de très basse fréquence ou des mots dont l'orthographe est peu fréquente. Le réseau est également capable de lire 79% des pseudo-mots. Cependant, les performances se sont révélées similaires à celles obtenues par un réseau identique n'ayant pas reçu d'apprentissage phonologique préalable ; même si le réseau non entraîné met plus de temps pour y parvenir. Les auteurs concluent que pour apprendre à lire, la capacité du réseau à extraire les connaissances phonologiques est plus importante que l'existence préalable de ces connaissances puisque celles-ci peuvent être rapidement apprises au moment de l'apprentissage de la lecture. Toutefois, il faut noter qu'une condition où le réseau n'est pas entraîné ne correspond pas à une situation réelle d'apprentissage de la lecture puisqu'il correspond à une situation où l'enfant ne serait jamais exposé à des informations phonologiques avant l'apprentissage de la lecture.

2.3 Les compétences de littéracie précoce

Pour apprendre à lire dans un système d'écriture alphabétique, nous avons vu qu'il est nécessaire que les enfants comprennent le principe alphabétique, c'est-à-dire que les lettres (graphèmes) de l'écrit représentent les sons (phonèmes) de l'oral. Pour cela, ils doivent également concevoir que les mots parlés sont constitués d'unités phonologiques et développer

une conscience phonologique de l'oral (i.e., la capacité d'identifier et manipuler de manière consciente les unités phonologiques des mots parlés). L'acquisition de la lecture suppose donc, à la fois, des compétences métalinguistiques et une connaissance des lettres de l'alphabet. Nous allons donc nous intéresser plus précisément à ces facteurs essentiels de l'apprentissage de la lecture.

2.3.1 La conscience phonologique

Les recherches focalisées sur le rôle de la conscience phonologique dans l'acquisition de la lecture suggèrent qu'il existe un lien causal et réciproque entre la conscience phonologique et les compétences en lecture. Scarborough (1998), dans une méta-analyse comprenant 27 études, obtient un coefficient de corrélation moyen de .46 ($ET=.16$) en utilisant les scores dans des épreuves de conscience phonologique recueillis en maternelle comme prédicteur du niveau ultérieur de lecture. Ainsi, les enfants qui possèdent précocement un bon niveau de conscience phonologique manifestent ultérieurement de bonnes performances en lecture (pour une étude en français voir par exemple, Casalis & Louis-Alexandre, 2000). Inversement, des enfants avec de faibles compétences en lecture manifesteraient également un faible niveau de conscience phonologique (Morais, Cary, Alegria, & Bertelson, 1979; Wagner, Torgesen, & Rashotte, 1994), comme c'est le cas de certains dyslexiques (Colé & Sprenger-Charolles, 1999). Dans le même sens, il a souvent été observé que les entraînements phonologiques sont efficaces pour faciliter l'apprentissage de la lecture, parce qu'ils favoriseraient la découverte du principe alphabétique (Bradley & Bryant, 1991; Bus & Van Ijzendoorn, 1999; Byrne & Fielding-Barnsley, 1990, 1991; pour des revues récentes, Castles & Coltheart, 2004). Toutefois, il est important de souligner que la valeur prédictive de la conscience phonologique sur l'apprentissage de la lecture serait essentiellement due, même s'il existe encore certains débats, au développement de la conscience dite phonémique plutôt qu'à celui de la conscience de plus larges segments comme les rimes et syllabes (Muter, Hulme, Snowling, & Taylor, 1998). C'est le développement de la conscience phonémique qui conduirait, à terme, l'enfant à comprendre le principe alphabétique. Cependant, comme le suggèrent certains chercheurs (Carroll, Snowling, Hulme, & Stevenson, 2003), la conscience de segments phonologiques, comme les syllabes et les rimes, se développerait plus naturellement dès les débuts de la scolarisation et serait un précurseur important de la conscience phonémique. En revanche, le développement de la conscience phonémique requiert un enseignement plus explicite avec une orientation

plus spécifique des activités phonologiques vers les correspondances lettres-sons. La maîtrise du langage oral ne conduit pas directement à la conscience des phonèmes. Stanovich (Repris par Anthony et al., 2002) utilise le terme de *sensibilité phonologique*, plutôt que de conscience phonologique, pour souligner l'idée d'un continuum allant d'une sensibilité réduite (e.g., détection) sur des unités larges (e.g., syllabes) vers un traitement plus profond (e.g., suppression) sur de petites unités (phonèmes). L'apprentissage du code alphabétique contribuerait au développement des habiletés phonologiques et particulièrement phonémiques, et ces mêmes habiletés faciliteraient en retour l'apprentissage de la lecture (Morais, Bertelson, Cary, & Alegria, 1986). Ainsi, conscience phonologique et apprentissage de la lecture s'influenceraient mutuellement.

2.3.2 La connaissance des lettres

L'apprentissage des lettres constitue un élément crucial du développement de la conscience phonémique. Read, Zhang, Nie et Ding (1986) ont montré que des lecteurs chinois, qui avaient appris à lire dans un système d'écriture logographique, n'avaient pas développé de compétences phonémiques contrairement aux lecteurs qui avaient appris à lire dans un système d'écriture alphabétique, le « *Hunyu pinyin* » officiellement enseigné depuis 1954. Dans le même ordre d'idées, une étude portant sur des adultes serbo-croates illettrés a montré que les individus considérés comme « faibles connaisseurs de lettres » (moins de 50% de lettres connues), contrairement aux individus considérés comme « bons connaisseurs » (totalité des lettres connues), se trouvaient en grandes difficultés face à des épreuves de suppression et de comptage de phonèmes (Lukatela, Carello, Shankweiler, & Liberman, 1995). Castles et Coltheart (2004) font l'hypothèse que la conscience phonémique se développerait à partir de connaissances orthographiques. Selon ces auteurs, l'apprentissage de l'écrit alphabétique permettrait à l'apprenti-lecteur de réaliser des tâches de conscience phonémique en rendant possible la manipulation des phonèmes à l'aide des images orthographiques des mots. En considérant par exemple une tâche classique de suppression de phonème, les prélecteurs qui possèdent peu ou pas de connaissances de la forme écrite des mots, devront résoudre la tâche en tentant de segmenter les sons dans les mots afin de supprimer le phonème requis. Les enfants possédant de meilleures connaissances orthographiques pourront aussi utiliser leur quelques connaissances pour supprimer la lettre ou le groupe de lettres qui correspondent au phonème cible (Castles & Coltheart, 2004). Cependant, Carroll (2004) montre que l'accroissement de la connaissance des lettres affecte

de manière inégale les différentes tâches de conscience phonémique. Par exemple, la connaissance des lettres serait plus fortement associée à la réussite à une tâche de substitution de phonème qu'à celle de suppression ou d'identification de phonème. La conscience phonémique ne serait donc pas une compétence qui se développerait en tout ou rien, et certains aspects de cette connaissance seraient plus ou moins fortement liés aux connaissances orthographiques et à la lecture. Toutefois, l'accès conscient aux phonèmes du langage oral n'est pas impossible en l'absence de connaissance orthographique. Ainsi, Hulme, Caravolas, Malkova et Brigstocke (2005) ont montré qu'un certain degré de manipulation phonémique peut être atteint par des enfants pour des phonèmes dont ils ne connaissent pas la correspondance graphique. Néanmoins, l'intérêt de l'hypothèse émise par Castles et Coltheart (2004) est de soulever la question de l'influence des connaissances orthographiques sur le développement de la conscience phonémique et de la lecture.

2.3.2.1 La connaissance du nom des lettres

La connaissance d'une lettre suppose celle de sa forme mais également celle du nom et du son qui correspondent à cette forme. Ces deux types de connaissances bien que liées donnent lieu à un développement particulier. En outre, le nom de la lettre serait un meilleur prédicteur du niveau de lecture au début de l'apprentissage que le son des lettres (Evans, Bell, Shaw, Moretti, & Page, 2006; Schatschneider, Fletcher, Francis, Carlson, & Foorman, 2004). Le nom de la lettre, contrairement à sa valeur phonémique, est indiqué très tôt aux enfants, généralement à travers l'énoncé de la comptine alphabétique et la lecture d'abécédaires. De nombreux travaux ont mis en évidence le rôle déterminant de la connaissance du nom des lettres dans l'acquisition de la lecture. Scarborough (1998) observe sur 24 études une corrélation moyenne de .52 ($ET=.14$) entre des scores de dénomination de lettres en maternelle et le niveau de lecture ultérieur. L'influence sur la lecture de la connaissance du nom des lettres, comme premier support de l'apprentissage des associations arbitraires lettre-son, a été abordée dans certaines recherches (pour une revue en français voir Foulin, 2007). Ainsi, Evans, Bell, Shaw, Moretti et Page (2006) montrent que la connaissance du nom des lettres (dénomination de lettres majuscules et minuscules) évaluée en grande section de maternelle prédit 51% de l'augmentation de l'identification de mots isolés lors de la première année d'apprentissage de la lecture ; prédiction plus importante que celle de la connaissance du son des lettres (41%). Ce résultat peut s'expliquer par le fait qu'en maternelle, la plupart des sons des lettres ne sont pas encore connus. Cependant, il semblerait que le pouvoir de prédiction de la connaissance du nom des lettres diminue dès la fin de la grande section de

maternelle, ce qui pourrait s'expliquer par des performances en dénomination qui plafonnent (Schatschneider, et al., 2004). Les études sur le rôle de la connaissance des lettres, et plus particulièrement du nom des lettres, dans l'acquisition de la lecture permettent d'apporter un nouvel éclairage sur le lien entretenu par ces deux acquisitions. Un premier type de recherche initié par Ehri (Ehri & Wilce, 1985; Scott & Ehri, 1990) montre que lorsque les enfants commencent à lire et qu'ils ne connaissent pas le nom des lettres, il leur est plus facile d'apprendre à lire des mots composés de lettres visuellement saillantes (mais sans lien avec la prononciation des mots), que des mots phonologiquement plausibles (où les lettres représentent les sons entendus dans le mot). Par ailleurs, les enfants qui connaissent le nom des lettres montrent le pattern inverse ; ils apprennent des orthographe à indices phonologiques plus aisément que des orthographe à indices visuels (De Abreu & Cardoso-martins, 1998). De plus, il a été montré que des enfants prélecteurs, avec un niveau moyen de connaissance du nom des lettres, pouvaient être amenés, lorsque la demande de la tâche augmente (c'est-à-dire lorsque le nombre de nouveaux mots à apprendre devient plus important), à utiliser une stratégie d'apprentissage analytique basée sur la correspondance entre la lettre et sa valeur phonologique (Ross, Treiman, & Bick, 2004). En effet, augmenter la demande de la tâche pourrait parfois encourager les enfants à tirer avantage de leurs compétences alphabétiques même faibles. Les relations systématiques entre les lettres et leurs noms rendraient plus aisé l'apprentissage d'un nombre important de mots puisqu'elles permettraient de déduire la prononciation des mots plutôt que d'utiliser des stratégies d'apprentissage par cœur des associations forme écrite/forme orale. Ces recherches supportent l'idée générale que la connaissance du nom des lettres peut être utilisée pour lier l'oral et l'écrit et ainsi sensibiliser les enfants à la nature phonologique de l'écrit. Dans ce sens, les recherches de Treiman et ses collaborateurs (e.g., Treiman, Tincoff, & Richmond-Welty, 1996) montrent que les enfants prélecteurs établiraient les premières correspondances entre l'oral et l'écrit en découvrant qu'il existe des liens entre les lettres dans les mots écrits et le nom des lettres dans les mots parlés. Dans leur recherche, les jeunes enfants fournissent, par exemple, plus facilement la première lettre de *beach* (plage) que la première lettre de *bone* (os), parce que la forme parlée de *beach* commence par /bi/, le nom de la lettre *b*, alors que la forme parlée de *bone* commence par /bo/, qui ne correspond pas au nom d'une lettre en anglais. Dans les premiers temps de l'acquisition de la lecture, ces liens lettres-sons seraient incomplets et se manifesteraient principalement pour les lettres en position initiale et finale dans les mots. Plus tard, l'utilisation des liens grapho-phonologiques évoluerait et prendrait davantage appui sur la connaissance du son des lettres. Pour progresser dans la

compréhension du principe alphabétique, les enfants doivent donc apprendre que les lettres dans les mots écrits correspondent à l'oral aux phonèmes des mots parlés.

2.3.2.2 La connaissance du son des lettres

La connaissance du nom des lettres influencerait la découverte des liens lettres-sons notamment parce que le nom de certaines lettres correspond au son qui leur est associé. Ainsi, par exemple, le nom des voyelles simples (*a, e, i, o, u*) est identique à leur son. En revanche, pour les consonnes plusieurs cas se présentent. Certaines consonnes, comme *b*, dont le nom se prononce /bé/, possèdent leurs sons, ici /b/, au début de leur nom (consonnes de type CV). D'autres consonnes, comme *f*, possèdent leurs sons à la fin de leur nom (consonne de type VC). Le nom de la lettre *f* soit /èf/ se termine avec le phonème /f/ qu'il symbolise. Enfin, certains liens entre le nom des consonnes et leurs sons sont arbitraires comme pour le *h*. Le lien unissant le nom et le son des lettres (qui renvoie aux différents types de lettres et à la structure phonologique de leur nom) aurait des conséquences directes sur l'apprentissage du nom lui-même et sur l'apprentissage du son des lettres. Ainsi, les noms de lettres qui contiennent le son de la lettre seraient mieux appris que ceux qui ne le contiennent pas. Plus précisément, les études sur la connaissance du nom des lettres montrent que les noms des voyelles sont plus facilement appris que les noms des consonnes (Cormier, 2006). Cependant, les études destinées à évaluer la connaissance du nom des lettres en fonction de leur structure phonologique conduisent à des résultats contradictoires. Ainsi, pour Cormier (2006), les consonnes de type VC seraient mieux dénommées et même écrites que les consonnes de type CV pour les lettres majuscules et minuscules. Néanmoins, pour Ecalte (2004), il n'existe aucune différence de niveau d'identification entre des consonnes de type VC ou CV dans le répertoire « cursif » alors que l'avantage est aux consonnes de type CV dans le répertoire « imprimerie ». Enfin, Treiman et Broderick (1998) relèvent des scores de dénomination et d'écriture de lettres équivalents quelle que soit la structure phonologique des consonnes majuscules. Concernant l'apprentissage du son des lettres, Share (2004) montre qu'il est favorisé par l'apprentissage préalable du nom des lettres. Plus précisément, les correspondances lettres-sons, pour les lettres dont le nom contient le phonème, sont apprises plus aisément que pour les lettres qui ne contiennent pas le phonème pertinent (principe d'acrophonie). Cet effet du type de lettre s'est révélé plus important pour les voyelles, puis pour les consonnes de type CV, par rapport aux consonnes de type VC ou les consonnes dont le son n'est pas clairement relié au nom (Ecalte, 2004; Ecalte, Magnan, & Biot-Chevrier, 2008; Evans, et al., 2006; McBride-Chang, 1999; Treiman & Broderick, 1998). Néanmoins,

connaître le nom d'une lettre n'est pas une condition nécessaire pour l'apprentissage du son, même si cela le favorise. C'est ce que montre une étude en hébreu où, après une même procédure et un même temps d'entraînement, des enfants de 5 ans étaient meilleurs pour connecter les graphèmes à leurs représentations phonémiques qu'à leurs noms (Levin, Shatil-Carmon, & Asif-Rave, 2006).

En résumé, la connaissance du nom des lettres exerce une influence sur le développement de la connaissance du son des lettres et des associations lettres-sons. Toutefois les relations qu'elle entretient avec la conscience phonémique restent à préciser.

2.3.3 La dénomination rapide

La prise en compte des habiletés phonologiques et de la connaissance du nom des lettres comme compétences précoces et cruciales pour l'apprentissage de la lecture est largement validée. Toutefois, ces deux compétences bien que prédictrices des premières compétences en lecture se révèlent souvent insuffisantes pour dépister les individus à risque de développer des troubles de la lecture (Scarborough, 1998). Outre la connaissance des lettres, la capacité à les dénommer rapidement semble être un facteur important pour le développement de la lecture. Dans ce cadre, une tâche de dénomination rapide sérielle (Rapid serial naming : RAN, Denckla & Rudel, 1974) s'est révélée particulièrement intéressante pour identifier différents niveaux de lecture (Watson & Willows, 1995) et prédire les futures compétences en lecture (pour une revue voir Scarborough, 1998). La tâche de RAN consiste à lire à haute voix et le plus rapidement possible cinq items (e.g., chiffres ou lettres) répétés dix fois chacun. Le RAN impliquerait donc une importante variété de processus, attentionnels, visuels, phonologiques (notamment en termes de précision et de rapidité) et articulatoires. Ainsi, le processus de dénomination rapide a été souvent apparenté aux traitements phonologiques impliqués dans la lecture, soit l'activation des représentations phonologiques nécessaire pour identifier un mot écrit. Cependant bien que dénomination rapide et habiletés métaphonologiques (notamment phonémiques) entretiennent des relations, qualifiées de complexes par Ramus (2003), chacune participe de manière indépendante à la variance des compétences en lecture (Manis, Seidenberg, & Doi, 1999). La conscience phonémique serait corrélée aux mesures de la précision de l'identification des mots (niveau du mot) et du décodage graphème-phonème (niveau de la lettre), alors que la dénomination rapide serait davantage corrélée à la rapidité d'identification des mots et à la rapidité du décodage (Wolf, Miller, & Donnelly, 2000). De plus, pour le RAN, la rapidité d'accès aux représentations des

différents symboles (e.g., couleur, lettres), serait le reflet de liens spécifiques avec les différentes tâches de lecture (e.g., lecture orale de mots isolés, de texte, tâches de compréhension) (Wolf, Bally, & Morris, 1986). Enfin, le pouvoir prédictif de la dénomination rapide serait plus important au début de l'apprentissage de la lecture (Manis, Doi, & Bhadha, 2000; Wolf, et al., 1986). Dans les premières années de l'acquisition de la lecture, on peut considérer qu'une lecture précise et rapide (fluente), de mots et textes, serait le résultat du développement d'une certaine qualité initiale des processus sub-lexicaux (phonologiques) et lexicaux (orthographiques) engagés dans l'identification des mots écrits et de leur automatisation progressive. Une fois la lecture acquise, la fluence reflèterait davantage un décodage précis et automatique qui ne demanderait que peu de ressources attentionnelles, celles-ci pouvant alors être affectées aux traitements visant à la compréhension de ce qui est lu (Wolf & Katzir-Cohen, 2001).

Le modèle de Laberge et Samuels (1974), qui traite de l'automaticité du traitement de l'information dans l'activité de lecture, peut fournir un cadre d'interprétation intéressant pour les tâches de dénomination rapide. Classiquement dans les modèles de lecture, l'information visuelle est transformée en passant par plusieurs étapes de traitements visuels, phonologiques et sémantiques. D'après les auteurs et Bonnefoy et Rey (2008), l'efficacité des processus mis en jeu à chaque niveau de traitement, pourrait être évaluée sur la base de deux critères : la précision et la rapidité qui permet d'en mesurer l'automaticité. Un comportement final automatique impliquerait une automatisation de chacune des sous-étapes de traitement dont il est le résultat. En résumé, une lecture précise et automatique se fonderait sur des processus orthographiques et phonologiques eux-mêmes efficaces et automatisés. Ceci expliquerait en partie le pouvoir prédictif, sur la réussite en lecture, de la connaissance du nom et du son des lettres, de la dénomination rapide et des habiletés métaphonémiques. Enfin, chez les apprentis-lecteurs, une identification précise et rapide des lettres, première étape de la lecture, serait donc particulièrement importante.

Nous avons vu dans ce chapitre que parmi les compétences linguistiques et alphabétiques, les habilités phonémiques et la connaissance des lettres sont considérées comme facilitant l'acquisition des règles de correspondance lettres-sons et la mise en place de la lecture (Figure 19).

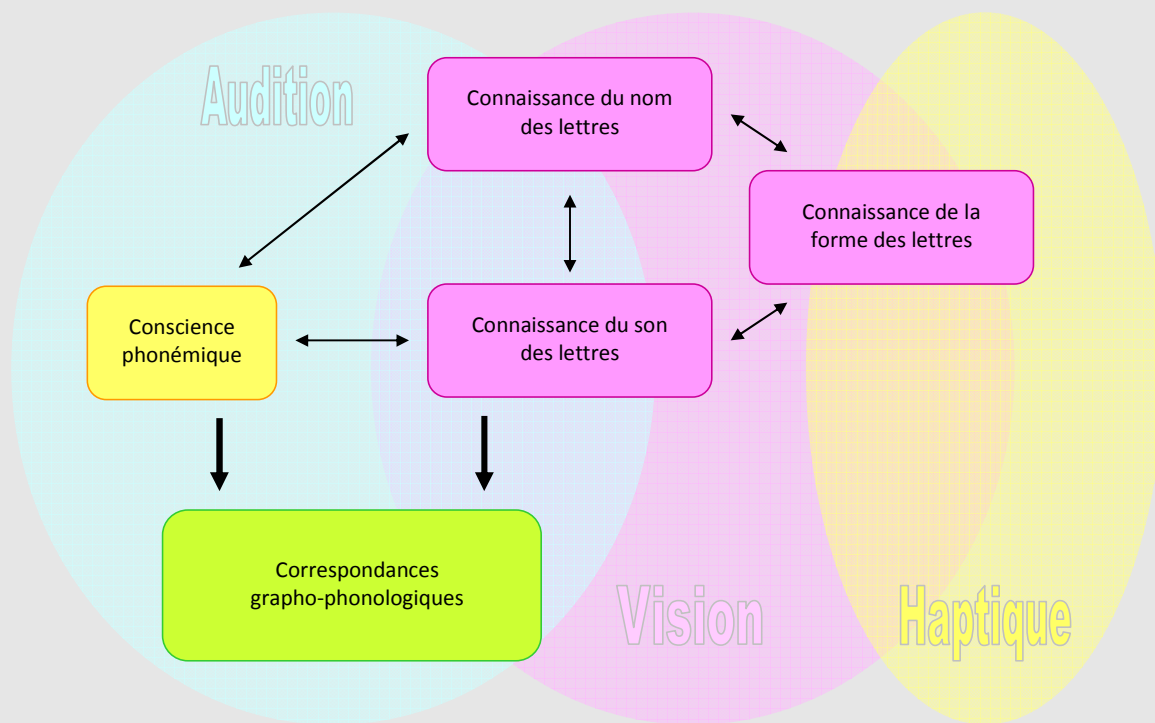


Figure 19. Représentation Schématique des compétences favorisant l'acquisition de la lecture. et des modalités sensorielles intervenant dans leur acquisition.

Les modèles de lecture considèrent généralement deux entrées sensorielles (visuelle et auditive) dans le traitement des lettres et des sons. Toutefois, comme nous l'avons vu, les lettres peuvent être représentées par des informations visuelles, auditives et sensorimotrices. Pourtant, rares sont les modèles qui intègrent l'apprentissage du geste moteur de l'écriture et qui l'envisage comme pouvant influencer l'apprentissage et le lien entre les représentations orthographiques et phonologiques.

Chapitre 3.

Les entraînements multisensoriels de la lecture

« Toucher les lettres et les regarder en même temps, fixe leur image plus rapidement à travers la coopération des sens. Plus tard, le deux faits se séparent; regarder devient lire; toucher devient écrire. Selon le type de l'individu, certains apprennent à lire en premier, d'autres à écrire »

Maria Montessori, *La Méthode Montessori*.

Nous avons vu que les lettres seraient représentées en mémoire non seulement par leur composante visuelle, auditive mais également par leur composante sensorimotrice. Cette représentation multisensorielle se mettrait en place pendant l'apprentissage simultané de la lecture et de l'écriture. Renforcer les liens entre les compétences perceptives et motrices pourrait alors améliorer la mémorisation des lettres et ainsi favoriser la compréhension du principe alphabétique chez les jeunes enfants. Les méthodes multisensorielles d'apprentissage s'appuient sur cette hypothèse. Avant de décrire ces méthodes qui proposent l'ajout d'une troisième modalité sensorielle (modalité haptique), nous allons faire le point sur les méthodes classiques d'apprentissage qui sollicitent les modalités visuelles et auditives.

3.1 Les entraînements classiques auditif et visuel

Afin de préparer ou améliorer le niveau des enfants dans l'activité de lecture, de nombreux chercheurs ont proposé des entraînements visant à améliorer les différentes habiletés étroitement liées à la lecture et qui prédisent le succès dans son acquisition

3.1.1 Les entraînements phonologiques

Nombreuses sont les recherches qui se sont focalisées sur la dimension phonologique impliquée dans l'apprentissage de la lecture et qui ont proposé des entraînements destinés à développer la conscience phonologique des enfants (pour des synthèses voir Bus & Van Ijzendoorn, 1999; Castles & Coltheart, 2004; Ehri, et al., 2001). La majorité des études qui évaluent les effets d'un tel entraînement révèle un effet significatif de l'entraînement phonémique sur le niveau de lecture. Toutefois, l'analyse des différentes méthodologies

employées révèle que les effets des entraînements phonologiques sont modulés par différents facteurs.

Ehri et ses collègues (2001) mettent en évidence une influence du moment où l'intervention est proposée. En effet, le niveau d'expertise en lecture est lié à l'efficacité des entraînements phonémiques. Ceux-ci bénéficient davantage aux enfants qui présentent plus de risques de devenir mauvais lecteurs ou dyslexiques (notamment lorsqu'ils possèdent des difficultés à manipuler les phonèmes dans les mots) qu'aux enfants normo-lecteurs. Cependant, les enfants déjà lecteurs mais présentant des retards en lecture (i.e., des difficultés d'identification des mots écrits) semblent être les moins avantagés. En d'autres termes, les entraînements seraient plus efficaces pour prévenir l'apparition de troubles de lecture plutôt que pour y remédier. Dans ce sens, les auteurs notent un effet du niveau de scolarisation des enfants, l'entraînement serait plus efficace s'il est réalisé avant l'apprentissage formel de la lecture, en grande section de maternelle, plutôt qu'en primaire. Cet effet n'est pas surprenant si l'on considère que ce sont ces enfants qui débutent les entraînements avec les plus faibles compétences phonémiques.

La transparence/opacité de la langue (régularité des liens entre graphèmes et phonèmes) dans laquelle les entraînements sont proposés va également moduler leurs effets. En effet, la transparence des orthographes se répercute sur l'utilisation de la procédure de décodage grapho-phonémique et la facilité de l'apprentissage de la lecture (Ziegler & Goswami, 2005). Ainsi, l'étude de Seymour, Aro et Erskine (2003), conduite dans 13 pays européens, montre que les enfants (5-6 ans) qui apprennent dans une orthographe opaque, telle que celle de l'anglais, ont des scores toujours plus faibles en lecture de pseudo-mots par rapport aux non anglophones apprenant dans des orthographes plus transparentes, comme celle de l'espagnol, de l'italien et même du français. De ce fait, il n'est pas étonnant qu'Ehri *et al.* (2001) notent un bénéfice plus important des entraînements phonémiques pour les systèmes orthographiques opaques. Dans ces cas, la nécessité d'un entraînement est plus importante puisque, contrairement aux systèmes orthographiques transparents, ils ne favoriseraient pas l'émergence précoce du phonème et l'utilisation des correspondances graphème-phonème. Des recherches inter-langues montrent dans ce sens que le décodage grapho-phonologique est utilisé plus précocement dans une orthographe transparente (Sprenger-Charolles, Siegel, & Bonnet, 1998). Ehri et ses collaborateurs (2001) mettent également en évidence un effet du type de tâches utilisé. Le plus fréquemment, les enfants apprennent à identifier, catégoriser, associer ou segmenter les phonèmes. Parmi les activités

possibles, sélectionner une ou deux tâches serait préférable pour favoriser l'effet des entraînements. Parmi les diverses combinaisons possibles, deux tâches de manipulation de phonèmes semblent jouer un rôle central dans l'apprentissage de la lecture et de l'orthographe. Proposer des tâches de fusion de phonèmes et de segmentation de mots en phonèmes serait particulièrement efficaces.

Les résultats des différentes études recensées dépendent aussi de la mesure utilisée pour évaluer le niveau de compréhension du principe alphabétique. Par exemple, la différence de performances entre les groupes entraînés et les groupes contrôles est plus faible lorsque les enfants doivent identifier des mots par rapport à des pseudo-mots. Il faut noter qu'une tâche de décodage de pseudo-mots permettrait une évaluation plus directe du niveau de compréhension du principe alphabétique et de son utilisation. En effet, la réussite à cette tâche requiert l'application des correspondances entre les graphèmes et les phonèmes qui témoigne du recours au décodage grapho-phonémique.

Dans leur méta-analyse, Ehri et ses collaborateurs mettent également en évidence une influence du statut de la personne qui conduit l'entraînement. Les effets des entraînements sur la lecture sont plus importants lorsqu'ils sont conduits par les chercheurs plutôt que par les enseignants, différence qui semble cependant disparaître lorsque ces derniers suivent une formation spécifique préalable (Blachman, Ball, Black, & Tangel, 1994).

Enfin, d'autres facteurs relatifs à la mise en place et au déroulement des entraînements ont été pointés comme ayant une influence sur l'efficacité des entraînements. La taille du groupe a une importance puisque l'entraînement est plus efficace s'il est réalisé en petits groupes de cinq ou six enfants plutôt qu'en individuel ou en classe entière. C'est l'interaction des enfants entre eux et l'interaction entre les enfants et l'expérimentateur, possible en petits groupes, qui favoriserait l'effet de l'entraînement. Le travail en petit groupe favoriserait le maintien de l'attention et la motivation sociale à réussir. Lorsque les enfants sont attentifs, répartir les séances en plusieurs périodes de 20 à 30 minutes serait également plus efficace que des entraînements plus longs ou plus courts ; la durée totale des interventions devant, par ailleurs, être comprise entre 5h et 18h. Les entraînements destinés à développer les compétences phonémiques n'ont pas besoin d'être longs pour exercer leur plus grand effet.

Par ailleurs, dans leur méta-analyse, Castles et Coltheart (2004) ont inclus les études qui proposent de développer uniquement la conscience phonologique et d'en évaluer les effets sur la lecture. Ils concluent qu'aucune étude n'apporte de preuve univoque d'un lien de cause à effet entre la conscience phonologique et la réussite en lecture. Ils suggèrent que la

conscience phonologique, particulièrement phonémique, participe à l'apprentissage de la lecture, mais ne permet pas d'améliorer directement les performances en lecture tant qu'elle n'est pas associée à l'apprentissage des lettres. La présence d'un support visuel de la lettre a également été relevée par Ehri et ses collègues (2001) comme étant un élément clé de l'effet des entraînements. Celui-ci permettrait d'expliciter le lien entre les sons et les lettres. C'est la présence du support visuel de la lettre qui marque la différence entre les entraînements strictement phonologiques et les entraînements phonologiques associés à l'apprentissage des lettres et des correspondances lettre-son.

3.1.2 Les entraînements phonologiques associés à l'apprentissage des lettres et des correspondances lettres-sons.

Si la conscience phonémique est nécessaire pour la compréhension du principe alphabétique, elle n'est cependant pas suffisante à elle seule pour acquérir des capacités de décodage (Bus & Van Ijzendoorn, 1999; Byrne & Fielding-Barnsley, 1989, 1990; Castles & Coltheart, 2004). L'efficacité d'un entraînement phonologique semble accrue s'il est associé le plus tôt possible à l'apprentissage des correspondances entre graphèmes et phonèmes (Torgesen, 2002). Byrne et Fielding-Barnsley (1989, 1990) précisent que ni la conscience phonémique, ni la connaissance des correspondances graphème-phonème seules ne sont suffisantes pour acquérir le principe alphabétique. A la suite de cette constatation, chez des enfants de maternelle, ils montrent que, comparativement à un entraînement contrôle, un entraînement qui propose de développer conjointement la conscience phonémique et la connaissance des lettres et des associations lettres-sons a un effet plus important sur les performances dans des tâches métaphonémiques et sur le décodage de mots écrits (Byrne & Fielding-Barnsley, 1991). Byrne et ses collaborateurs (Byrne & Fielding-Barnsley, 1993, 1995; Byrne, Fielding-Barnsley, & Ashley, 2000) mettent également en évidence un bénéfice de ce type d'entraînement à moyen et long terme. Les enfants du groupe expérimental décodent plus de mots et de pseudo-mots que ceux du groupe contrôle en fin de maternelle et début de primaire (Byrne & Fielding-Barnsley, 1993). Ils décodent également plus de pseudo-mots et obtiennent de meilleures performances dans des tâches de compréhension, deux et trois ans après les entraînements (Byrne & Fielding-Barnsley, 1995). Enfin, même si les effets sont plus modestes, six ans après, les enfants initialement entraînés bénéficient toujours de meilleures performances en lecture de mots irréguliers et de pseudo-mots (Byrne, et al., 2000).

En conclusion, c'est la combinaison des activités de manipulation phonémique avec l'enseignement de l'identité des lettres et des correspondances entre les lettres et les sons qui constitue la condition la plus favorable à l'acquisition et au développement du décodage grapho-phonologique et donc de la lecture (Bus & Van Ijzendoorn, 1999; Hatcher, Hulme, & Ellis, 1994). Ce type d'entraînement contribue ainsi à développer, d'une part, des représentations phonologiques et orthographiques des mots et, d'autre part, à établir des connexions entre ces deux types de représentations. Présenter simultanément des stimuli en modalité auditive et visuelle a donc un effet bénéfique sur l'apprentissage de la lecture, d'autant plus que celui-ci est initié tôt dans la scolarité.

3.2 Les entraînements multisensoriels

Bien que les entraînements décrits précédemment préparent de manière efficace l'apprentissage de la lecture, certains enfants ne parviennent pas ou difficilement à appréhender la logique du principe alphabétique et à l'utiliser. Certains chercheurs se sont donc intéressés aux aides qu'il était possible de proposer afin de mieux apprendre à lire ou de remédier aux difficultés de lecture existantes. Pour tenter de favoriser l'élaboration des connexions entre les représentations orthographiques et phonologiques des mots, Bryant et Bradley (1985) préconisent l'utilisation de lettres en plastique dans leurs entraînements. En manipulant les lettres à l'intérieur des mots, l'enfant découvrirait seul que les mots qui partagent un même son ont aussi une lettre ou une séquence de lettres en commun.

3.2.1 Les premières méthodes de remédiation

Les méthodes d'apprentissage de la lecture qui sollicitent les modalités sensorielles visuelle et auditive mais également la modalité haptique manuelle, sont dites « multisensorielles ». Déjà au début du vingtième siècle, Maria Montessori (1912) proposait certaines activités pédagogiques de préparation à la lecture consistant en l'exploration manuelle de lettres découpées dans du papier de verre. Cette approche a été largement exploitée, de manière plus ou moins systématique, dans le domaine de la remédiation des difficultés de lecture (voir Hatwell & Gentaz, 2008, pour un historique des recherches en France). Par exemple, Fernald et Keller (1921) proposent une méthode multisensorielle à des enfants présentant des retards en lecture. Un mot était écrit en grandes lettres script et prononcé par l'enseignant, puis il était demandé à l'enfant de le tracer avec deux doigts tout en prononçant chacune des syllabes. Après chaque tracé, l'enfant devait essayer d'écrire le

mot sans recours au modèle ; si une erreur était produite, elle n'était pas corrigée. Après une courte pause, la procédure était répétée jusqu'à ce qu'il soit capable d'écrire le mot de mémoire. Fernald (1943/1988) n'a pas élaboré de théorie explicite permettant de justifier sa méthode, mais semble considérer comme importante la mémoire des gestes qui ont permis de tracer les mots. Elle propose que les indices kinesthésiques issus du mouvement des mains et du mouvement des lèvres seraient essentiels pour lier la forme orale et écrite des mots. Fernald (1943/1988) rapporte, dans ses études de cas, des améliorations spectaculaires chez des enfants présentant de sévères retards de lecture. Cependant, le manque de détails concernant les participants et la procédure ainsi que l'absence de groupe contrôle, nous invite à la prudence concernant les conclusions de ces premières études.

D'autres auteurs se sont inspirés de cette méthode dans leurs travaux expérimentaux. Kirk (1933) a étudié l'effet du tracé sur la lecture de mots isolés chez six enfants de 9 à 11 ans possédant un quotient intellectuel faible (63 à 80). Deux séries de mots de trois lettres (e.g., ask, new, eat, pot...) étaient appris à l'aide de deux méthodes différentes. Dans la « méthode visuelle conventionnelle », les enfants devaient regarder les mots et les prononcer. Dans la « méthode de traçage (kinesthésique) manuel », les enfants devaient, en plus, tracer les mots avec un crayon de papier. Les résultats montrent que les enfants renaient plus de mots après les avoir tracé. Malgré une méthodologie expérimentale plus contrôlée (temps de présentation, plan intra, ordre de présentation des méthodes), l'interprétation des résultats reste compliquée du fait du petit nombre de participants et de leur retard intellectuel.

L'idée principale qui ressort de ces études princeps est qu'il existerait un effet de la modalité tactilo-kinesthésique sur la perception visuelle et la mémoire d'un matériel verbal tel que les lettres de l'alphabet.

3.2.2 Les entraînements multisensoriels chez les enfants âgés présentant des difficultés

Certaines études suggèrent que les effets positifs observés sur le niveau de lecture suite à un entraînement multisensoriel seraient la conséquence d'une meilleure mémorisation des lettres explorées visuellement et haptiquement. Hulme (1981) a conduit une série d'expériences chez des enfants de 8-10 ans normo-lecteurs et ayant des retards de lecture. Il propose aux enfants d'explorer des séquences de lettres et de formes abstraites, soit visuellement (condition V), soit en regardant et en traçant simultanément du doigt chacune d'entre elles (condition VT). Les différents résultats montrent un effet positif de la condition

VT sur le nombre de stimuli reconnus. Cependant, les lecteurs en retard reconnaissent significativement plus de lettres au sein des séquences que les enfants normo-lecteurs, alors que l'effet du traçage est équivalent pour les deux groupes pour l'apprentissage de formes abstraites. Une supériorité de la condition VT par rapport à la condition V a également été observée chez les adultes pour les formes abstraites. De façon générale, l'amélioration de la reconnaissance des formes suite au traçage haptique serait due à l'exploitation d'une mémoire motrice. En effet, lorsqu'une tâche d'interférence motrice est présentée durant la période de rétention, seules les performances en condition VT sont détériorées. De même, une tâche d'interférence visuelle perturbe davantage la mémorisation dans la condition V que dans la condition VT. L'auteur conclue donc à un double codage, moteur et visuel pendant l'exploration haptique des stimuli. Il propose que les informations stockées dans les deux systèmes soient en quelque sorte sommées, permettant ainsi une meilleure reconnaissance des stimuli. Pour expliquer la différence observée entre les séquences de formes abstraites et les lettres, Hulme (1981) suggère que les enfants normo-lecteurs utiliseraient, comme les adultes, une stratégie de recodage des lettres en une forme phonologique pour les retenir, alors que les lecteurs en retard n'en seraient pas capables. En effet, ces derniers compteraient davantage sur leur mémoire visuelle qui serait améliorée par la motricité. Toutefois, pour pouvoir associer un stimulus visuel à un label verbal, il faut au préalable être capable de reconnaître efficacement les formes présentées. Dans une dernière étude, Hulme (1981) propose à des enfants de 9 ans d'apprendre des triplets de symboles associés arbitrairement à des noms dans les conditions V et VT. Les résultats révèlent que tracer les triplets permet de mieux les associer à leur nom. Comme le niveau de connaissance des lettres est étroitement lié au niveau de lecture, l'exploration haptique de lettres, qui permettrait d'améliorer les performances en reconnaissance de lettres, devrait de ce fait favoriser l'apprentissage des correspondances lettre-son et par conséquent le niveau de décodage.

3.2.3 Les entraînements multisensoriels chez les jeunes enfants

Chez des enfants prélecteurs, Beech, Pedley et Barlow (1994) montrent que s'entraîner à tracer des lettres verticalement sur un écran d'ordinateur ne facilite pas l'apprentissage des correspondances lettre-son.

Par ailleurs, Williams (1975) a proposé, dans son étude sur 40 enfants âgés de 4-5 ans, de tester plus directement les effets du tracé de mots sur la discrimination visuelle de formes. Elle montre un effet très spécifique des entraînements ; s'entraîner à la copie améliorerait la

copie de mots, alors que s'entraîner à discriminer visuellement les mots serait une bonne aide à la discrimination. Williams conclue donc que pour apprendre à lire et écrire, il ne faut pas compter sur un transfert de compétences entre les entraînements, même s'il s'agit de manipuler le même matériel (les lettres de l'alphabet). Toutefois, l'auteur nous met en garde contre la sur-généralisation de ces résultats qui concernent des enfants en provenance de milieux socio-économiques défavorisés. Dans ce sens, Bara *et al.*, (2007) ont mis en évidence un effet de leurs entraînements multisensoriels un an après la fin de leur intervention pour des enfants de 5-6 ans en provenance de milieux socio-économiques défavorisés, alors que pour les enfants de milieux socio-économiques moyens, les effets bénéfiques étaient constatés dès la fin de la grande section de maternelle.

D'un autre côté, chez des enfants de cinq ans, Longcamp, Zerbato-Poudou et Velay (2005) ont mis en évidence que la reconnaissance visuelle des lettres est facilitée lorsqu'elles ont été préalablement écrites à la main par rapport à une écriture au clavier d'ordinateur. Dans ce sens, il a été montré, chez des enfants japonais de troisième et de cinquième années de primaire, que la mémorisation de lettres est meilleure lorsque les enfants les apprennent en les écrivant que lorsqu'ils les voient uniquement (Naka, 1998). Cependant, à trois ans, les mouvements d'écriture ne contribueraient pas à améliorer les performances en reconnaissance de lettres.

Dans une série d'études, il a été proposé d'utiliser des entraînements visuo-haptique pour préparer l'apprentissage de la lecture et de l'écriture chez de jeunes enfants de grande section de maternelle (Bara, et al., 2007; Bara, et al., 2004; Gentaz, et al., 2003). Ces études permettent de tester plus directement l'hypothèse selon laquelle l'exploration haptique de lettres favoriserait l'apprentissage du principe alphabétique (correspondance lettre-son) et le niveau de décodage des enfants. Les entraînements mis en place se différencient par les modalités sensorielles sollicitées pour explorer des lettres cursives, soit visuo-haptique et haptique (lettres en relief), soit uniquement visuelle. Dans une première expérience, les auteurs ont comparé deux entraînements qui proposent de façon commune des activités destinées à développer la conscience phonologique, la connaissance des lettres et les associations graphème-phonème. En revanche, ces entraînements se distinguent par le type d'exploration qui sous-tend le travail sur l'identité des lettres (Gentaz, et al., 2003). Ainsi, l'entraînement dénommé « Haptique-Visuel-Auditif-Métaphonologique » (HVAM) sollicite les modalités haptique, visuelle et auditive et l'entraînement dénommé « Visuel-Auditif-Métaphonologique » (VAM) les modalités visuelle et auditive. Les enfants ont suivi un entraînement pendant sept semaines (une séance d'entraînement par semaine de 30 minutes,

centrée autour de l'étude d'un son et de la lettre correspondante, et une séance de révision). Leurs performances ont été évaluées avant et après les entraînements au moyen d'un test de reconnaissance de lettres, de trois épreuves de conscience phonologique (rimes, identification de phonèmes en position initiale et finale dans les mots) et d'un test de décodage de pseudo-mots. Les résultats révèlent une amélioration plus importante du décodage de pseudo-mots après l'entraînement HVAM qu'après l'entraînement VAM. Par ailleurs, une amélioration similaire après les deux entraînements est obtenue pour toutes les autres mesures. L'ensemble de ces résultats suggère donc que l'ajout de la modalité haptique dans ce type d'entraînement amplifie les effets bénéfiques sur la compréhension et l'utilisation du principe alphabétique chez les jeunes enfants, telles que mesurées par la tâche de décodage de pseudo-mots. D'après les auteurs, la séquentialité de l'exploration induite par la modalité haptique pourrait expliquer ces effets bénéfiques : son ajout obligerait l'enfant à traiter les lettres de manière plus séquentielle et donc plus analytique que lorsque les lettres sont présentées visuellement. L'exploration haptique faciliterait alors l'élaboration des connexions entre les représentations orthographiques des lettres, traitées visuellement, et les représentations phonologiques des sons correspondants, traités auditivement. Dans une seconde étude, Bara *et al.* (2004) ont donc tenté de déterminer si les effets bénéfiques observés après l'entraînement HVAM pouvaient s'expliquer par la séquentialité de l'exploration des lettres elle-même (indépendamment des modalités sensorielles sollicitées) ou par l'exploration visuo-haptique et haptique *per se*. Ainsi, les deux entraînements HVAM et VAM ont été comparés à un troisième entraînement VAM-séquentiel, dans lequel l'exploration des lettres se faisait visuellement et séquentiellement. Plus précisément, les lettres sont présentées aux enfants sur un écran d'ordinateur et s'inscrivent progressivement à vitesse constante. Les résultats révèlent une amélioration similaire après les trois entraînements dans les trois tests de conscience phonologique et de connaissance de lettres et confirment ainsi les résultats observés dans l'étude précédente. Bien que le nombre moyen de pseudo-mots décodés augmente significativement pour les trois types d'interventions, il reste néanmoins plus important après l'entraînement HVAM qu'après les entraînements VAM-séquentiel et VAM (qui ne diffèrent pas significativement). Ces résultats suggèrent donc que ce n'est pas l'exploration séquentielle des lettres indépendamment des modalités sensorielles qui explique l'amélioration des performances en décodage mais l'exploration visuo-haptique et haptique *per se*.

Il faut noter, dans les deux précédentes études, que les entraînements VAM et HVAM permettent de reconnaître un nombre équivalent de lettres entraînées. Ces résultats ne reproduisent pas ceux de Hulme (1981) ou de Longcamp et ses collègues (2005) qui

trouvaient une meilleure reconnaissance des lettres suite à l'utilisation du geste moteur pour apprendre les lettres. Cependant, chez des enfants en provenance de milieux socio-économiques défavorisés, présentant un retard dans le développement de certaines compétences nécessaires pour l'apprentissage de la lecture (connaissance des lettres, vocabulaire et conscience rimique), Bara *et al.* (2007) observent un effet plus important de l'exploration haptique sur la reconnaissance des lettres par rapport à une exploration uniquement visuelle. Améliorer cette compétence a ensuite permis aux enfants, une fois l'instruction formelle de la lecture débutée (en CP), de saisir plus rapidement la logique du principe alphabétique et a eu pour conséquence une amélioration de leur niveau de décodage.

Selon les études présentées, nous avons pu noter une importante hétérogénéité dans les effets des programmes d'instructions ; les effets peuvent être inexistants, faibles ou relativement importants et concerner les compétences liées à la lecture (connaissance des lettres) ou encore les capacités de lecture elles-mêmes (lecture de mots et de pseudo-mots). Les études diffèrent également quant au type d'exploration proposé en plus de la vision pour interagir avec les lettres. Certaines études préconisent le suivi, avec les doigts, de contours de lettres en relief ou en creux, alors que d'autres préfèrent le surlignage des lettres avec le doigt ou à l'aide d'un crayon. Labat, Ecalte et Magnan (2010) notent également que, dans la plupart des études, l'exploration des lettres est toujours visuo-haptique, c'est-à-dire simultanée dans les modalités visuelle et haptique. Ceci pourrait contribuer à la coordination des représentations visuelle et haptique et rend difficile de faire la part du bénéfice spécifique à chaque exploration sensorielle. Labat et collaborateurs (2010) proposent donc trois entraînements différents à des enfants âgés de 3 et 5 ans : un entraînement qui sollicite la modalité visuelle (V) et des entraînements haptique (H) et graphomoteur (G) qui sollicitent la modalité tactilo-kinesthésique en absence de vision. Dans l'entraînement H, l'expérimentateur guide le geste manuel de l'enfant pour explorer la lettre en relief avec l'index en suivant l'ordre conventionnel de l'écrit. Dans l'entraînement G, l'expérimentateur guide le bras de l'enfant de manière à surligner la lettre dans l'ordre conventionnel de production de la lettre. Ils notent une tendance de l'entraînement H à améliorer la connaissance des lettres chez les enfants de 3 ans et un effet de l'entraînement G pour la lecture des pseudo-mots chez les enfants de 5 ans. Malgré la faiblesse de leurs effectifs, les auteurs concluent que les informations tactilo-kinesthésiques sous un format « haptique » ou « graphomoteur » contribueraient à la construction des connaissances sur l'écrit. Toutefois, à trois ans, les résultats suggèrent qu'un entraînement haptique pourrait être plus efficace (tendance) par rapport à un entraînement grapho-moteur, tandis qu'à cinq ans l'inverse serait vrai.

Un dernier intérêt de l'entraînement haptique est d'initier l'enfant au geste moteur nécessaire pour réaliser les lettres. Dans certaines de ses études Bara (2005) a proposé différents tests d'écriture aux enfants ayant suivi des entraînements HVAM (lettres en relief ou en creux). L'exploration de lettres en relief améliorait la qualité globale du tracé (évaluée par des enseignants) alors que celle de lettres en creux facilitait l'apprentissage de l'ordre de la séquence motrice. Sachant que la qualité de l'écriture dépend en partie de la qualité de la représentation visuelle de la lettre en mémoire, qui servirait à guider le geste moteur, la perception haptique pourrait à la fois jouer un rôle dans la mémoire du geste moteur pour lui-même mais aussi sur la qualité de la représentation visuelle de la lettre.

3.2.4 Les entraînements avec les dispositifs haptique

Depuis quelques années le développement des *dispositifs haptiques* a offert aux spécialistes de puissants outils d'étude qui permettent de produire, contrôler des stimuli haptiques ou multisensoriels. Les dispositifs haptique sont des interfaces permettant à l'utilisateur d'interagir avec le monde virtuel ou réel via le sens du toucher. Deux principaux types de systèmes haptiques sont souvent distingués dans la littérature. D'une part, les systèmes avec stimulations tactiles qui affectent la surface cutanée par étirement ou pression (non abordés ici). D'autre part, les systèmes à retour de force qui mobilisent la proprioception et affectent la position et le mouvement des membres.

Parmi les dispositifs haptique, les dispositifs Phantom[®] à retour de force sont certainement les plus exploités (Figure 20). Un Phantom est un bras articulé, dont l'extrémité est attachée à un stylet, qui peut être contrôlé avec six degrés de libertés : translations en X, Y et Z et rotations autour de ces mêmes axes. Des objets virtuels peuvent être implémentés et explorés grâce au stylet. Quand le stylet est en contact avec la surface virtuelle, les moteurs fournissent des retours de force qui donnent l'impression de toucher la surface. Les moteurs qui fournissent le retour de force peuvent également être programmés afin de guider le mouvement le long de la surface virtuelle. Ainsi, le Phantom peut être utilisé dans le cadre d'un guidage haptique (passif ou semi-passif) ou d'une exploration active dans un espace en deux ou trois dimensions. Il faut toutefois noter que lorsque les personnes utilisent un outil intermédiaire (e.g., un stylo) pour explorer un objet, l'information tactile est restreinte. Dans ce cas, la perception haptique est considérée comme étant indirecte ou à distance (comme avec l'utilisation d'une canne blanche) et la peau récolte la plupart des informations sous la forme de vibrations.

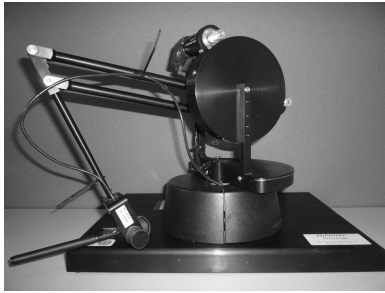


Figure 20. Exemples de bras robots à retour de force utilisés dans cette thèse : le PHANTOM Desktop 1.5 (à gauche) et le PHANTOM Omni (à droite).

3.2.4.1 Chez les adultes

Il existe quelques recherches récentes qui utilisent les bras robots à retour de force dans le but d'apprendre à des participants de nouvelles formes. Dans ces études, les auteurs proposent d'évaluer les capacités de participants à reproduire des formes après un guidage haptique. Classiquement, les personnes sont guidées par l'interface haptique, avec ou sans vision de leur mouvement, le long d'une trajectoire nouvelle selon une dynamique idéale. Feygin, Keehner et Tendick (2002) trouvent, chez des adultes, un effet bénéfique de l'apprentissage par guidage haptique pour des trajectoires complexes en trois dimensions (Figure 21). Alors que l'apprentissage visuel (voir le robot tracer la trajectoire idéale) est plus efficace pour apprendre la forme correcte, les écarts entre la trajectoire idéale et la trajectoire réalisée étant les moins importants (erreur spatiale), l'ajout d'un guidage haptique permet de mieux apprendre les aspects temporels liés à la production de la trajectoire.

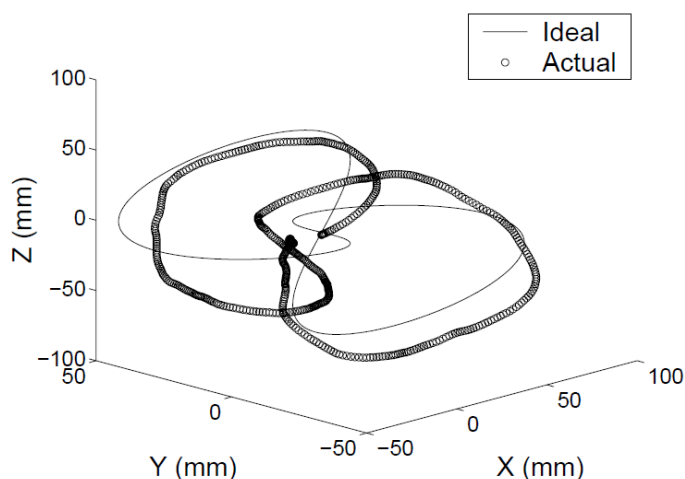


Figure 21. Exemple d'une trajectoire en trois dimensions idéale (en trait plein) et réalisée par un participant (points successifs) [repris de Feygin et al., 2002].

D'un autre côté, Liu, Cramer et Reinkensmeyer (2006) montrent qu'une démonstration visuelle de la nouvelle trajectoire 3D à produire est aussi efficace qu'un guidage haptique (en présence de vision) pour faire diminuer les erreurs spatiales.

Toutefois, nous pouvons nous demander si les effets observés dans les études précédentes sont le fait du guidage haptique ou simplement de l'activité motrice supplémentaire proposée. Bluteau, Coquillart, Payan et Gentaz (2008) proposent des entraînements qui impliquent tous la vision et qui diffèrent sur le mode de production de formes nouvelles en deux dimensions (lettres arabes et japonaises). L'entraînement « sans guidage haptique » implique la vision et une activité de copie classique des stimuli où seules les capacités sensori-motrices propres aux participants sont engagées. Le second type d'entraînements, « avec guidage haptique », propose de corriger l'utilisateur en temps-réel grâce au dispositif haptique, en ramenant soit la main du participant sur la trajectoire théorique en cas d'écart de production, soit en lui retransmettant les forces théoriquement ressenties lors du tracé de la lettre modèle (pour plus de détails sur le type de guidage haptique voir Bluteau et al., 2008). Bien que les résultats ne montrent pas d'effet supplémentaire du guidage haptique pour l'apprentissage de la forme (mesuré par l'écart spatial entre la forme produite et la forme de référence), la fluidité des tracés (vitesse moyenne, nombre de pics de vitesse¹⁰) est améliorée pour quelques lettres.

3.2.4.2 Chez les jeunes enfants

Les études chez les enfants sont encore plus rares et concernent souvent un faible nombre de participants. Néanmoins, Palluel-Germain, Bara, Hennion, Gouagout, et Gentaz (2006) ont testé les effets d'un entraînement utilisant le guidage haptique sur l'écriture de lettres (rapidité et fluidité des tracés), chez 22 enfants de première année de primaire. Lors d'une phase d'apprentissage, une lettre cursive (b, f, k, s) était entraînée à chaque intervention (une par semaine). Dans l'entraînement « guidage haptique », les enfants réalisaient des exercices, générés par l'interface haptique, centrés sur les informations spatiales de la lettre (la forme et l'ordre de production) et sur la dynamique des mouvements de production. Parallèlement, les enfants du groupe « contrôle » se familiarisaient à l'aide de courts exercices avec la forme de la lettre et devaient copier la lettre ainsi que des mots la contenant. L'analyse

¹⁰ Le nombre de pics de vitesse fournit des informations d'accélération et de décélération le long de la trajectoire. Plus le mouvement est fluide, moins le nombre de pics de vitesse est important.

des temps de mouvement et du nombre de pics de vitesse, réalisée après les entraînements, révèle que la fluidité de l'écriture est améliorée suite au « guidage haptique ».

Dans l'ensemble, ces résultats montrent que l'ajout d'informations haptiques, générées par des dispositifs de réalité virtuelle, lors de phase d'apprentissage de nouvelles trajectoires ou caractères, améliore la qualité des productions chez les adultes et les enfants.

Dans ce chapitre, nous avons vu qu'afin de préparer efficacement ou d'améliorer le niveau des enfants dans l'activité de lecture, certains chercheurs ont proposé des entraînements visant à améliorer les compétences qui prédisent le succès dans son acquisition (conscience phonémique, connaissance des lettres et des correspondances entre les lettres et les sons) mais également d'exploiter les composantes visuelle, auditive et sensori-motrices associées aux lettres de l'alphabet. La plupart des recherches mettent en évidence qu'une exploration haptique ou kinesthésique des lettres permet une amélioration de la connaissance des lettres sous ses divers aspects, forme, nom, son ou encore geste de production, et/ou du niveau de compréhension du principe alphabétique et de son utilisation. La modalité haptique semble donc jouer un rôle particulièrement important, et pourtant très peu pris en compte, dans l'apprentissage de la lecture et de l'écriture. Cependant, la nature des processus mis en œuvre dans la perception haptique de lettres reste à préciser afin de mieux comprendre son apport dans les apprentissages scolaires fondamentaux.

3.3 Problématiques, objectifs et méthodes

Nous avons pu voir que malgré des méthodes d'apprentissage de la lecture efficaces qui visent à améliorer les habiletés qui prédisent son succès (habiletés métaphonémiques, connaissance des lettres et des associations lettres-sons), certains enfants ne parviendraient pas ou difficilement à appréhender la logique du principe alphabétique et à l'utiliser. Aussi, de nombreux chercheurs se sont intéressés à la meilleure manière de préparer l'apprentissage ou d'améliorer le niveau des enfants dans l'activité de lecture. Parmi ces méthodes, proposer une modalité sensorielle supplémentaire pour interagir avec les lettres améliorerait le niveau de lecture (Bara, 2005; Bara, et al., 2007; Bara, et al., 2004; Fernald & Keller, 1921; Gentaz, et al., 2003; Kirk, 1933), de la connaissance des lettres (Hulme, 1981 ; Longcamp et al., 2005 ; Naka, 1998) et la qualité des tracés de lettres (Palluel-Germain et al., 2006). Dans le cadre plus précis de la préparation à l'apprentissage chez des enfants scolarisés en classe de grande section de maternelle, Bara et ses collaborateurs montrent un bénéfice de l'exploration haptique de lettres en relief sur les performances en décodage de pseudo-mots. Cependant, la nature précise des processus mis en œuvre dans la perception haptique de lettres reste discutée.

Le travail présenté dans cette thèse a pour objectif général d'évaluer le rôle de la modalité haptique dans la préparation à la lecture et à l'écriture chez des enfants de grande section de maternelle. Plus précisément nous nous sommes attelés à déterminer la manière dont l'exploration haptique de lettres bénéficie au décodage des pseudo-mots et au tracé des lettres. Notre méthode générale a consisté en la comparaison d'entraînements multisensoriels, sollicitant les modalités haptique et visuelle, à des entraînements unimodaux visuel ou haptique, dans un travail d'exploration des lettres.

Le chapitre 4 visera à déterminer si les bénéfices observés suite aux entraînements multisensoriels de préparation à la lecture en GSM peuvent être expliqués par la séquentialité de l'exploration des lettres, indépendamment de la modalité sensorielle sollicitée, ou par l'exploration haptique *per se*. Pour cela, nous avons proposé trois entraînements de préparation à la lecture. Ces entraînements visaient de manière commune à développer la conscience phonémique, la connaissance des lettres et des associations graphème-phonème. Ils se différençaient par la manière dont les lettres étaient explorées, visuellement et haptiquement dans l'entraînement HVAM (haptique-visuel-auditif-métaphonémique), visuellement et globalement dans l'entraînement VAM (visuel-auditif-métaphonémique), et

visuellement et séquentiellement (à l'aide d'une présentation respectant les caractéristiques biologiques du mouvement) dans l'entraînement VAM-biologique (visuel-auditif-métaphonémique-biologique). Afin de connaître leurs effets, nous avons proposé d'évaluer avant et après les entraînements le niveau de décodage de pseudo-mots, des habiletés métaphonémiques et de la connaissance des lettres.

Le chapitre 5 présente une série d'épreuves concernant les compétences de littéracie précoce et le niveau de décodage des enfants. L'étude présentée vise à mieux comprendre l'intérêt des mesures de la connaissance des lettres. Pour ce faire, nous avons proposé une évaluation longitudinale (décembre à avril) des compétences de littéracie précoce d'enfants scolarisés en grande section de maternelle. Des épreuves d'habiletés métaphonémiques (identification de phonème en position initiale et finale dans les mots), de connaissance du son et du nom des lettres (dénomination et identification) et une tâche de décodage de pseudo-mots ont été proposées lors des deux sessions d'évaluation. Pour les tâches de connaissance du nom des lettres, deux types de mesures ont été proposés : une mesure de précision (nombre de réponses correctes) et une mesure de rapidité (temps de réponse), reflet de l'automatisation de l'accès à cette connaissance.

Le chapitre 6 propose d'évaluer les effets de l'ajout d'une exploration haptique de lettres cursives, sur la fluidité des tracés, dans un entraînement de préparation à l'écriture. Deux entraînements seront comparés. L'entraînement visuo-haptique (VH) impliquera un dispositif haptique (bras à retour de force) qui permet de guider le bras de l'enfant le long d'une lettre cursive virtuelle, dans le sens de l'écriture, tout en respectant les règles cinématiques de production. L'entraînement contrôle (C) proposera quant à lui des exercices classiques de préparation à l'écriture papier-crayon. Avant et après les entraînements seront recueillis des paramètres de fluidité de l'écriture sur les lettres entraînées : vitesse moyenne, nombre de pics de vitesse et nombre de levers de crayons.

Les chapitres 7 et 8 réinterrogent les mécanismes à l'origine des bénéfices de l'ajout de la modalité haptique dans une exploration de lettres. Afin de s'abstraire des influences qui existent entre les compétences de littéracie précoce et le niveau de décodage au début de l'apprentissage de la lecture, nous nous intéresserons à une population adulte.

Dans le chapitre 7, nous verrons si des adultes confrontés à un nouvel apprentissage d'associations arbitraires entre des formes abstraites et des sons totalement inédits, sont capables de mieux mémoriser ces associations lorsqu'ils explorent haptiquement les formes. Nous poserons également la question de la meilleure mémorisation des formes et de sa

potentielle implication dans l'association entre les formes et les sons nouveaux. Nous avons donc comparé une méthode multisensorielle d'apprentissage où les formes étaient explorées visuellement et haptiquement et une méthode dite « classique » comprenant une exploration uniquement visuelle des formes. Dans les deux conditions expérimentales, les sons associés à chacune des formes étaient présentés simultanément dans un casque. Nous avons mesuré suite aux apprentissages le niveau de reconnaissance des formes et des sons ainsi que des associations forme-son.

Enfin, dans le chapitre 8, nous avons souhaité vérifier si une exploration haptique de formes abstraites (sans son associé) permet d'apprendre plus rapidement de nouvelles formes et d'améliorer leur reconnaissance visuelle *a posteriori*. Trois conditions d'apprentissage ont donc été proposées aux adultes : un apprentissage multisensoriel visuo-haptique (VH), un apprentissage unisensoriel haptique (H) et enfin, un apprentissage unisensoriel visuel (V). Nous avons mesuré les temps nécessaires à l'apprentissage dans chacune des conditions ainsi que la précision et la rapidité de la reconnaissance visuelle des formes deux jours après la fin de l'apprentissage.

Etudes expérimentales

Chapitre 4.

Exploration haptique des lettres : séquentialité vs. motricité

Etude 1. Evaluation de l'effet de l'exploration séquentielle des lettres sur la compréhension et l'utilisation du principe alphabétique en grande section de maternelle

Cette étude a fait l'objet d'une publication sous la référence suivante (voir Annexe E) :

Hillairet de Boisferon, A., Bara, F., Colé, P., & Gentaz, E. (2007). Préparation à la lecture des jeunes enfants : effets de l'exploration visuo-haptique des lettres et de la perception visuelle des mouvements d'écriture. *L'année Psychologique*, 107, 537-564.

4.1 Introduction

L'apprentissage de la lecture nécessite de développer des représentations phonologiques et orthographiques des lettres et d'établir des connections entre ces deux types de représentations. Au début de l'acquisition de la lecture, le décodage est plus particulièrement dépendant des habiletés métaphonémiques et de la connaissance des lettres de l'apprenti lecteur (chapitre 2.3). Dans le but d'améliorer l'apprentissage de la lecture, des entraînements multisensoriels qui impliquent la vision et l'audition, mais également la modalité haptique, ont été mis en place. Il s'agit le plus souvent de proposer une exploration haptique de lettres qui consiste simplement à suivre du doigt les contours de la lettre. Au cours des dernières décennies, les recherches ont révélé des résultats contrastés et parfois contradictoires (chapitre 3.1.3). Toutefois, il semble qu'il existe un bénéfice de l'ajout d'une activité motrice autour des lettres sur l'apprentissage ou la remédiation de la lecture. Parmi les hypothèses avancées, Bara et ses collaborateurs (2004) proposent que la séquentialité de l'exploration haptique soit à l'origine des effets bénéfiques des méthodes multisensorielles. La modalité haptique, tout comme la modalité visuelle, est une modalité spatiale. Par son biais, il est possible d'accéder et de traiter les informations de formes des objets. Cependant, la perception haptique, dont le fonctionnement est séquentiel, est moins globale et plus analytique que la perception visuelle. Lorsque l'enfant explore des lettres avec sa main et ses doigts, les informations de contours doivent être recueillies, maintenues dans le temps et intégrées pour se construire un percept final. Ainsi, l'ajout de la modalité haptique, pour

appréhender les lettres, obligerait l'enfant à les traiter de manière plus analytique qu'il ne le fait naturellement lorsque les lettres sont présentées visuellement.

L'objectif de cette étude était de déterminer si la séquentialité de l'exploration pourrait expliquer les effets bénéfiques de l'entraînement multisensoriel de préparation à la lecture chez des enfants de grande section de maternelle. Pour cela, nous avons repris et amélioré l'entraînement VAM-séquentiel de Bara et ses collègues (2004), dans lequel l'exploration des lettres se faisait visuellement et séquentiellement (les lettres se dessinaient progressivement à vitesse constante sur un écran d'ordinateur). Celui-ci a donc été modifié de manière à ce que la présentation des lettres se fasse en accord avec l'ensemble des règles de production motrice des mouvements d'écriture (condition VAM-biologique). Trois entraînements ont été proposés. De façon commune, ceux-ci proposaient des exercices visant à améliorer les capacités métaphonémiques et l'apprentissage des lettres et des associations lettres-sons. Ils différaient, en revanche, par les modalités sensorielles sollicitées (visuelle, auditive et haptique) ainsi que par la manière d'explorer les lettres (simultanée ou séquentielle). Dans les entraînements VAM-biologique (Visuel-Auditif-Métaphonémique-biologique) et HVAM (Haptique-Visuel-Auditif-Métaphonémique), l'exploration était séquentielle et effectuée dans l'ordre qui correspond au sens de l'écriture, alors que l'exploration était simultanée et sans ordre imposé dans l'entraînement VAM (Visuel-Auditif-Métaphonémique). Cette comparaison permet d'évaluer le rôle de la séquentialité de l'exploration indépendamment de la modalité perceptive sollicitée. D'autre part, la lettre était perçue par une exploration haptique active et intentionnelle dans l'entraînement HVAM, alors qu'elle était perçue visuellement et de manière plus passive dans les entraînements VAM et VAM-biologique. Cette comparaison permet d'évaluer le rôle de la perception haptique en elle-même.

De manière générale, le recours à la modalité haptique manuelle devrait améliorer la mémorisation des lettres et favoriser la connexion entre les graphèmes et les phonèmes. De fait, de meilleures performances en décodage devraient être observées après l'entraînement HVAM qu'après l'entraînement VAM. Plus spécifiquement, si la séquentialité de l'exploration explique l'effet positif de l'ajout de la modalité haptique dans un entraînement de préparation à la lecture, une amélioration plus importante des performances en décodage après les entraînements HVAM et VAM-biologique qu'après l'entraînement VAM devrait être observée. Par contre si l'exploration haptique *per se* explique cette amélioration, alors une amélioration plus importante des performances en décodage après l'entraînement HVAM qu'après les entraînements VAM et VAM-biologique devrait être observée.

4.2 Méthode

4.2.1 Participants

Trente trois enfants (15 filles et 18 garçons) d'âge moyen 5 ans et 7 mois (de 5 ans et 2 mois à 6 ans et 1 mois) ont participé à cette recherche. Seuls les enfants qui ont participé à toutes les séances d'entraînement ont été pris en compte pour l'analyse des résultats (9 enfants ont été retirés de l'échantillon de départ pour cette raison). Ces enfants étaient scolarisés dans deux classes de grande section de maternelle d'écoles différentes de Grenoble. Tous les enfants appartenaient à des milieux socio-économiques moyens. Dans chaque classe, les enfants des trois groupes d'entraînements ont été appariés le plus strictement possible sur les caractéristiques suivantes : âge, capacités métaphonémiques, niveau de vocabulaire (EVIP), niveau de performance non verbale (carrés du WPPSI), connaissance des lettres de l'alphabet et décodage de pseudo-mots. Des tests *t* de Student visant à vérifier la répartition équivalente des participants entre les groupes ont été effectués. Les valeurs *t* ainsi obtenues se sont révélées non significatives pour chacun des critères ($p > .20$). Les résultats des prétests sont reportés dans le Tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques des enfants avant les entraînements dans chacun des groupes (moyennes et écarts-types entre parenthèses).				
Entraînement	Age (mois)	EVIP	Carré du WPPSI	Identification de lettres (/26)
HVAM	64	64.5 (11.8)	26.7 (4.8)	13.00 (5.67)
VAM-biologique	64	62.9 (11.7)	25.5 (4.4)	11.27 (5.76)
VAM	65	64.5 (9.9)	27.3 (5.6)	8.36 (7.51)

4.2.2 Matériel et procédure

Les séances d'entraînement portaient sur sept phonèmes choisis en fonction de leur fréquence d'apparition dans la langue française (Rondal, 1997). Ainsi, les phonèmes choisis (/a/, /i/, /r/, /l/, /t/, /b/, /p/) comptent parmi les 11 plus fréquents de la langue française avec néanmoins une exception (/b/). Nous avons également choisi de travailler des correspondances graphème-phonème qui sont extrêmement régulières. Ce choix a été effectué afin de faciliter le travail des enfants. Les sessions d'entraînement débutaient par l'étude des

phonèmes associés aux graphèmes « a » et « i », et qui correspondent aux voyelles les plus fréquentes en français (plus précisément, les deux phonèmes les plus fréquents de la langue française) mais également à des sons plus facilement identifiables perceptivement que les consonnes. Puis les séances se poursuivaient avec les phonèmes /r/ et /l/ qui renvoient aux deux consonnes les plus fréquentes de la langue française, continuaient avec les phonèmes correspondants aux lettres « t » et « p » et se terminaient avec le phonème /b/. Le choix de travailler la correspondance grapho-phonémique « b » se motive par le fait qu'il s'agit d'une correspondance difficile et, ce pour deux raisons au moins. D'une part, la lettre « b » peut se confondre visuellement par rotation avec les lettres « p » et « d ». D'autre part, par rapport, aux autres phonèmes étudiés, le phonème /b/ est la seule consonne occlusive non voisée, difficilement prononçable et identifiable en isolat (Serniclaes, 2003).

4.2.2.1 Prétests et post-tests

Les capacités métaphonémiques, le niveau de connaissance des lettres et le niveau de décodage étaient évalués chez les enfants de manière individuelle une à deux semaines avant et après les entraînements. Les capacités métaphonémiques étaient testées à l'aide de deux tâches d'identification de phonèmes en position initiale et finale dans les mots. Pour chacune de ces tâches, des images en noir et blanc représentant des mots familiers et faciles à identifier étaient présentées (une description détaillée du matériel est fournie en Annexe A). Chaque tâche était précédée de trois essais avec feedback afin de s'assurer que les enfants avaient bien compris la consigne.

Tâche d'identification de phonèmes en position initiale : Quatre images étaient présentées à l'enfant. A chaque essai l'expérimentateur montrait une première image, la posait sur la table et énonçait le mot qu'elle représentait. Ce premier mot était utilisé par l'enfant pour trouver parmi les trois autres images, celle qui correspondait au mot qui commençait par le même son. Par exemple : « haricot » était le premier mot et l'enfant devait choisir parmi « éléphant, avion, télévision ». Les différents essais portaient sur chacun des phonèmes faisant l'objet des entraînements. A chaque essai la position de l'item cible était contrôlée afin d'éviter la mise en place de stratégies de réponse basées sur l'ordre de présentation des images. Un point par bonne réponse était attribué (note sur 7).

Tâche d'identification de phonèmes en position finale : Le même principe était utilisé à la différence que l'enfant devait retrouver le mot qui finissait par le même son que le mot présenté en premier. Par exemple, l'expérimentateur présentait le mot « colombe » et l'enfant

devait choisir parmi les mots « tigre, vélo, herbe ». On attribuait un point par bonne réponse (note sur 7).

Tâche d'identification des lettres de l'alphabet : L'expérimentateur énonçait le nom des lettres une par une de façon aléatoire et l'enfant devait indiquer sur des planches, représentant cinq lettres écrites en caractère cursif dans un ordre différent de celui de l'alphabet, la lettre qu'il avait entendue (le but étant de réduire le nombre d'erreurs dues à une recherche trop étendue de la lettre parmi 26). Chaque bonne réponse était notée un point. En prétest les 26 lettres de l'alphabet étaient testées alors qu'en post-test, seules les 7 lettres faisant l'objet de l'entraînement étaient évaluées (note sur 7). L'objectif du prétest sur les 26 lettres était d'obtenir une mesure générale des connaissances des lettres de l'alphabet des enfants.

Tâche de décodage de pseudo-mots : Les pseudo-mots étaient composés uniquement des lettres étudiées pendant les entraînements. Il était précisé aux enfants que les mots étaient inventés. Trois des douze pseudo-mots présentés étaient composés de deux lettres (par exemple « ba »), six de trois lettres (par exemple « ila ») et trois de quatre lettres (par exemple « tiba »). On attribuait un point pour chaque pseudo-mot lu correctement (note sur 12).

4.2.2.2 Les entraînements

Trois groupes équivalents de 11 enfants ont été constitués en fonction de leur âge et des résultats obtenus aux prétests dans les épreuves suivantes : tâches d'habilités métaphonémiques, niveau de vocabulaire (*EVIP - Echelle de vocabulaire en images Peabody*, Dunn & Theriault Whalen, 1988), niveau de performance non verbale (carrés de la *WPPSI - Wechsler Preschool and Primary Scale of Intelligence*), connaissance des lettres de l'alphabet et décodage de pseudo-mots. Un entraînement spécifique était administré à chacun des groupes par le même expérimentateur : HVAM, VAM-biologique ou VAM. Chaque entraînement était composé de huit séances, une séance hebdomadaire pour chaque lettre et une séance de révision finale. Une lettre et un son différents étaient étudiés de la même façon à chaque séance (mêmes activités dans le même ordre). Les phonèmes étudiés étaient présentés des plus fréquents aux moins fréquents dans la langue française : le /a/ lors de la première séance, puis le /i/, le /r/, le /l/, le /t/, le /p/ et enfin le /b/. Les séances d'entraînement duraient approximativement 25 minutes et se déroulaient à l'école dans des salles isolées du bruit. Les enfants étaient assis par petits groupes de 5 à 6 autour d'une table ronde, face à l'expérimentateur, de manière à favoriser les interactions. L'expérimentateur veillait à solliciter chacun des enfants lors des différentes activités. Chaque entraînement incluait les

mêmes activités métaphonémiques : comptine, posters et jeux de cartes (voir Annexe A pour une description détaillée du matériel). La différence concernait les différentes modalités sensorielles sollicitées et la manière d'explorer les lettres.

L'entraînement HVAM

La comptine et l'activité d'identification des lettres : chaque séance débutait par la lecture de la comptine qui contenait un grand nombre de fois le son correspondant à la lettre étudiée. Le but était de sensibiliser l'enfant au son à l'aide de petites histoires amusantes, faciles à se rappeler et à répéter. L'expérimentateur lisait la comptine et demandait aux enfants de repérer le son qui revenait le plus souvent et sur lequel porterait la séance. Si aucun enfant ne parvenait à identifier le son cible, l'expérimentateur le leur dévoilait. Les enfants répétaient alors chaque phrase après leur énonciation pour se familiariser avec le son étudié. Pour favoriser l'apprentissage des associations graphème/phonème, une petite lettre mobile (Figure 24) était distribuée à chaque enfant, après la comptine. Il s'agissait de petites lettres en plastique que les enfants pouvaient manipuler librement et qu'ils gardaient en main pendant les activités sur les posters. Les lettres *a* et *r* mesuraient 2.3 cm de haut, la lettre *i*, 3 cm et les lettres *l*, *t*, *p* et *b*, 4.5 cm.

Les posters : les enfants travaillaient ensuite sur deux panneaux de 50 x 65 cm sur lesquels étaient collées six images de 20 x 15 cm. Le premier panneau était composé de trois images qui correspondaient aux mots commençant par le son cible et de trois images correspondant aux mots distracteurs. L'expérimentateur plaçait ce premier poster face aux enfants et énonçait le nom de chacune des images en veillant à ne pas prononcer l'article devant le mot afin d'éviter toute confusion. Chaque enfant devait trouver les mots commençant par le son étudié pendant la séance et venir les chuchoter à l'oreille de l'expérimentateur, afin que tous les enfants puissent participer. Lorsque chaque enfant avait trouvé au moins un mot, les réponses étaient révélées au groupe et discutées avec les enfants afin de déterminer si elles étaient correctes ou non. L'expérimentateur installait ensuite le poster comprenant les images qui correspondaient aux mots finissant par le son cible et répétait le même protocole.

Les activités visuo-haptique et haptique d'exploration des lettres : de grandes lettres en mousse (3mm d'épaisseur) de couleur (Figure 24), collées sur un support en carton plume (20 x 27 cm) étaient ensuite distribuées à chacun des enfants et fixées sur la table face à eux. Les lettres *a* et *r* mesuraient 5.5 cm de haut, la lettre *i* 8 cm et les lettres *l*, *t*, *p*, et *b* 11 cm. Les enfants devaient dans un premier temps explorer la lettre librement avec leurs doigts puis on

leur demandait de suivre avec leur index le sens de l'écriture (Figure 22). L'exploration tactile était réalisée par chaque enfant deux ou trois fois les yeux ouverts puis les yeux fermés (Figure 23). L'expérimentateur observait et contrôlait la manière dont chaque enfant explorait la lettre. La même activité était ensuite réalisée avec les petites lettres. Il s'agissait de petites lettres en plastique identiques aux lettres mobiles collées sur une plaque de carton plume de 10 x 11 cm. Deux tailles de lettres étaient utilisées afin de faciliter l'apprentissage et l'exploration des lettres. En effet, les mouvements d'amplitude moyenne impliquant le système main-bras-épaule sont plus faciles à contrôler avec précision que les mouvements de faible amplitude (Hatwell *et al.*, 2000). Les grandes lettres, qui induisaient des mouvements d'amplitude moyenne, aidaient les enfants à réussir la tâche de poursuite visuo-manuelle et leur fournissaient en plus de la manière d'explorer les lettres, des indices proprioceptifs pour coder les orientations spatiales. Ceci facilitait alors l'exploration des petites lettres qui nécessitaient des mouvements de faible amplitude. Une fois l'exploration haptique terminée, une tâche de discrimination tactile de la petite lettre était proposée (Figure 23). Les enfants devaient explorer deux lettres, sans contrôle visuel, et discriminer la lettre étudiée de la lettre distractrice, qui lui ressemblait graphiquement. La lettre *a* était associée à la lettre distractrice *e*, le *i* au *u*, le *r* au *n*, le *l* au *k*, le *t* au *b*, le *p* au *q* et le *b* au *l*. L'expérimentateur observait les mouvements exploratoires et si les enfants ne parvenaient pas à identifier correctement la lettre, il leur suggérait de prendre davantage de temps pour explorer les lettres.

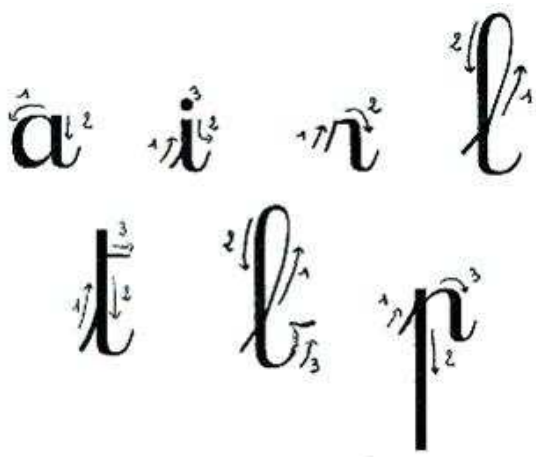


Figure 22. Typographie de chaque lettre. Les flèches numérotées indiquent l'ordre d'exploration des lettres.

Les jeux de cartes : la séance se terminait par deux jeux de cartes. Les jeux étaient composés d'images représentant six mots cibles qui débutaient ou se terminaient par le son étudié ainsi que deux mots distracteurs. Les cartes étaient disposées sur la table, face visible, et l'expérimentateur énonçait le nom de chacun des mots représentés. Les enfants

choisissaient alors, chacun à leur tour, une carte représentant un mot qui débutait par le son étudié pour le premier jeu ou qui finissait par le son cible pour le second. Si un enfant se trompait, le choix était discuté en groupe et après des explications, l'enfant qui avait fait l'erreur pouvait piocher une nouvelle carte. Le jeu se terminait lorsqu'il ne restait plus de cartes cibles disponibles.



Figure 23. Les activités visuo-haptique et haptique d'exploration des lettres. Exemple d'exploration haptique de la lettre « b » réalisée les enfants les yeux ouverts puis les yeux fermés (à gauche). Exemple de discrimination haptique entre la lettre « b » (cible) et la lettre « l » (distractrice) réalisée par les enfants sans contrôle visuel (à droite).

L'entraînement VAM

La comptine et l'activité d'identification des lettres: la comptine était la même que celle présentée dans l'entraînement HVAM. Après la comptine, l'expérimentateur distribuait à chaque enfant une carte d'exploration visuelle et leur montrait l'orientation correcte de la lettre. Chaque lettre était imprimée sur un morceau de papier collé sur une petite carte (Figure 24). La taille des lettres était la même que pour l'activité d'identification dans l'entraînement HVAM. L'expérimentateur demandait aux enfants de suivre des yeux le tracé de la lettre et de se concentrer sur la forme, les lignes et les courbures de celle-ci. Les cartes représentant la lettre cursive à apprendre restaient visibles pendant l'activité suivante (posters).

Les posters : les deux posters présentés étaient identiques à ceux de l'entraînement HVAM.

Les activités visuelles d'exploration des lettres: Les enfants réalisaient une tâche de reconnaissance visuelle sous la forme d'un jeu de barrage où ils devaient barrer la lettre étudiée. Une feuille (format A4) sur laquelle étaient imprimées quatre lignes de onze lettres cibles et lettres distractrices (qui partageaient des caractéristiques physiques avec la lettre cible), était distribuée aux enfants. Chaque ligne de lettres contenait trois types de lettres

distractrices (dans le but d’augmenter la difficulté de l’activité, l’utilisation d’une seule lettre distractive rendant la tâche de discrimination visuelle trop facile et rapide) et un nombre variable de lettres cibles (afin d’éviter l’utilisation de stratégies basées sur le nombre d’item à barrer). Nous avons utilisé 17 exemplaires de la lettre cible et 9 exemplaires de chaque lettre distractive. La lettre cible *a* était associée aux lettres distractrices *c*, *e* et *x* ; la lettre *i* aux lettres *o*, *u* et *v* ; la lettre *r* aux lettres *m*, *n* et *s* ; la lettre *t* aux lettres *b*, *d* et *k* ; la lettre *l* aux lettres *d*, *k* et *t* ; la lettre *p* aux lettres *g*, *j* et *q* et la lettre *b* aux lettres *h*, *k* et *l*.

Le jeu de pioche : Afin de rendre équivalent la durée et le nombre d’activités entre les entraînements, un jeu de carte supplémentaire était proposé. Les cartes étaient disposées face cachée sur la table et les enfants en piochaient une chacun à leur tour. Chaque jeu était composé de 16 cartes de 7 x 5 cm représentant la lettre cible en quatre exemplaires (deux rouges et deux noires) et trois types de lettres distractrices en quatre exemplaires chacune (deux rouges et deux noires). Les lettres distractrices associées aux lettres cibles étaient les mêmes que celles utilisées pour le jeu de barrage. Les enfants devaient juger si la lettre qu’ils avaient piochée correspondait à la lettre étudiée ou à une lettre distractive, en la mettant dans une des deux boîtes placées face à eux (soit celle de la lettre cible, soit celle des lettres distractrices). Lorsqu’un enfant faisait une erreur, l’avis des autres enfants était demandé et après des explications, il pouvait piocher une autre lettre.

Les jeux de carte : Les deux jeux de carte étaient les mêmes que dans l’entraînement HVAM.

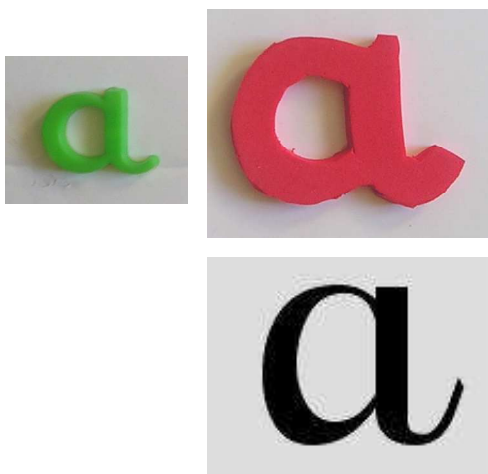


Figure 24. Exemples de lettres utilisées dans l’entraînement HVAM (lettre mobile en haut à gauche et lettre en mousse en haut à droite) et dans l’entraînement VAM (en bas).

L'entraînement VAM-biologique

Le matériel et le déroulement de la séance étaient les mêmes que pour l'entraînement VAM mais la lettre bien que présentée visuellement l'était de manière séquentielle. La lettre était tracée séquentiellement sur un écran d'ordinateur (en noir sur fond blanc). Il s'agissait d'un enregistrement vidéo d'un véritable mouvement d'écriture. Les instantanés pris par la caméra préservaient ainsi les caractéristiques spatiales et temporelles du mouvement biologique filmé. Une fois la lettre entièrement dessinée par un acteur, elle restait immobile et visible à l'écran pendant 2 secondes puis disparaissait durant 25 millisecondes et recommençait à se dessiner (Figure 25). La taille des lettres à l'écran était de 4.5 cm pour le *a*, le *i* et le *r*, de 9.5 cm pour le *b*, le *l* et le *p* et de 9 cm pour la lettre *t*. Les temps (en secondes) mis pour dessiner chaque lettre étaient : pour le *a* : 7s, pour le *i* : 6s, pour le *r* : 5.25s, pour le *b* : 7.45s, pour le *l* : 5.75s, pour le *p* : 8s et pour le *t* : 7.5s. L'expérimentateur demandait aux enfants de suivre des yeux le tracé de la lettre et de porter leur attention sur la forme, les lignes et les courbures de celle-ci.



Figure 25. Extraits du film présentant au cours d'une séance de l'entraînement VAM-biologique l'écriture naturelle d'un « l ».

4.2.2.3 La séance de révision

A l'issue des sept séances d'entraînements les enfants participaient à une séance de révision. La séance débutait par le rappel des sept lettres étudiées et des sept sons correspondants. Les enfants effectuaient une exploration visuelle, visuelle séquentielle ou haptique des lettres, selon le type d'entraînement suivi. Dans l'entraînement HVAM les enfants devaient suivre les contours de chacune des lettres en mousse avec les doigts, yeux ouverts, puis yeux fermés. Dans l'entraînement VAM les enfants exploraient visuellement chaque lettre. Enfin, dans l'entraînement VAM-biologique les enfants regardaient chacune des lettres se dessiner progressivement sur l'écran. La séance se poursuivait par un jeu de dominos (voir la présentation du matériel en Annexe A). Les dominos étaient composés de

deux images placées côte à côte. Toutes les images représentaient des mots commençant ou finissant par les sept sons étudiés pendant les entraînements. Deux jeux de dominos étaient proposés, le premier correspondant aux mots qui commençaient par un des sons étudiés et le second aux mots qui finissaient par un de ces sons. Les dominos étaient disposés, en deux fois (afin de faciliter la recherche et la mémorisation des mots), face visible sur la table et chaque image était nommée. L'expérimentateur posait le premier domino et les enfants devaient, chacun à leur tour, attacher un nouveau domino afin que les images juxtaposées commencent ou finissent par le même son. Cet entraînement métaphonémique permettait de réactiver mais également de vérifier les connaissances des enfants sur les différents sons appris pendant les entraînements.

4.3 Résultats

4.3.1 Décodage de pseudo-mots.

Le nombre moyen de pseudo-mots (et les écarts-types) correctement décodés par les enfants avant et après les entraînements sont présentés dans le Tableau 2.

Une ANCOVA 3 (entraînement) \times 2 (période) sur le nombre de pseudo-mots correctement décodés a été réalisée, avec comme covariants les performances aux différents prétests (vocabulaire, des carrés du WPPSI, connaissance de lettres et tâches métaphonémiques). Cette analyse révèle un effet principal significatif de la période [$F_{(1,30)}=32.64$, $p<.01$] : les enfants décodaient davantage de pseudo-mots après les entraînements ($m=3.06$) qu'avant ($m=0.57$). L'effet principal du type d'entraînement est significatif [$F_{(2,25)}=4.82$, $p<.05$] de même que l'interaction (entraînement \times période) [$F_{(2,30)}=5.85$, $p<.01$].

Rappelons que les hypothèses alternatives concernant l'amélioration des performances en décodage de pseudo-mots après l'entraînement HVAM étaient les suivantes : si le travail d'exploration séquentielle est responsable des améliorations en décodage, nous devrions observer des performances de décodage similaires dans le groupe VAM-biologique et dans le groupe HVAM et des performances inférieures dans le groupe VAM. En revanche, si l'exploration haptique est responsable en elle-même des améliorations, alors les performances en décodage devraient être meilleures dans le groupe HVAM que dans les deux autres groupes (qui ne devraient pas différer). Afin de tester ces hypothèses alternatives, nous avons effectué les comparaisons planifiées suivantes : respectivement, HVAM > VAM-biologique =

VAM et HVAM = VAM-biologique > VAM. Les deux contrastes n'étant pas orthogonaux, nous avons appliqué une correction de seuil de Boole-Bonferroni ($\alpha = .25$). La première comparaison est significative [$F_{(1,24)}=8.79$, $p<.01$] et son résidu se révèle non significatif [$F_{(1,24)}=0.49$, $MSE = 4.47$, $p>.05$]. Enfin, La deuxième comparaison [$F_{(1,24)}=3.77$, $MSE=5.47$, $p>.05$] n'est pas significative tandis que son résidu est significatif [$F_{(1,24)}=6.18$, $MSE=4.47$, $p<.05$]. Le nombre de pseudo-mots correctement décodés était donc significativement plus élevé après l'entraînement HVAM ($m=5.54$) qu'après l'entraînement VAM-biologique ($m=2.27$) et VAM ($m=1.36$), qui ne différaient pas significativement entre eux.

Tableau 2. Nombre moyen (et écarts-types) de pseudo-mots correctement décodés (max.12) avant et après chaque entraînement.

Entraînement	Prétest	Post-test
HVAM	1.00 (1.48)	5.54 (3.88)
VAM-biologique	0.45 (0.69)	2.27 (3.20)
VAM	0.27 (0.65)	1.36 (1.63)

4.3.2 Identification des sept lettres cibles

Le Tableau 3 présente le nombre moyen (et les écarts-types) de lettres cibles identifiées par les enfants avant et après les entraînements.

Une ANCOVA 3 (entraînement) \times 2 (période) sur le nombre de lettres cibles identifiées a été réalisée, avec comme covariants les performances aux prétests en vocabulaire (EVIP), carrés du WPPSI, tâches métaphonémiques et décodage de pseudo-mots. Cette analyse révèle un effet principal de la période significatif [$F_{(1,30)}=83.85$, $p<.01$] : les enfants identifiaient davantage de lettres après les entraînements ($m=4.69$) qu'avant ceux-ci ($m=2.78$). L'effet principal du type d'entraînement [$F_{(2,25)}=0.86$, $p>.05$] et l'interaction (entraînement \times période) [$F_{(2,30)}=1.31$, $p>.05$] ne sont pas significatifs.

Tableau 3. Nombre moyen (et écarts-types) de lettres reconnues (max. 7) avant et après chaque entraînement

Entraînement	Prétest	Post-test
HVAM	3.27 (1.19)	4.60 (1.74)
VAM-biologique	2.90 (1.13)	5.00 (1.41)
VAM	2.18 (1.94)	4.48 (2.36)

4.3.3 Capacités métaphonémiques

Le nombre moyen de bonnes réponses (et écarts-types) aux deux tâches métaphonémiques avant et après les entraînements sont représentés dans le Tableau 4.

4.3.3.1 Tâche d'identification de phonème en position initiale dans les mots

Une ANCOVA 3 (entraînement) \times 2 (période) sur le nombre de bonnes réponses à la tâche d'identification de phonème en position initiale a été réalisée, avec comme covariants les performances aux prétests en vocabulaire (EVIP), carrés du WPPSI, connaissance de lettres et décodage de pseudo-mots. Cette analyse révèle un effet principal significatif de la période [$F_{(1,30)}=47.95$, $p<.01$] : les performances des enfants étaient supérieures après les entraînements ($m=5.75$) qu'avant ceux-ci ($m=3.90$). L'effet principal du type d'entraînement [$F_{(2,25)}=0.58$, $p>.05$] et l'interaction (entraînement \times période) [$F_{(2,30)}=0.36$, $p>.05$] ne sont pas significatifs.

4.3.3.2 Tâche d'identification de phonème en position finale dans les mots

Une ANCOVA 3 (entraînement) \times 2 (période) sur le nombre de bonnes réponses à la tâche d'identification de phonème en position finale a été réalisée, avec comme covariants les performances aux prétests en vocabulaire (EVIP), carrés du WPPSI, connaissance de lettres et décodage de pseudo-mots. Cette analyse révèle un effet principal significatif de la période [$F_{(1,30)}=77.96$, $p<.01$] : les performances des enfants étaient supérieures après les entraînements ($m=4.99$) qu'avant ceux-ci ($m=3.33$). L'effet principal du type d'entraînement [$F_{(2,25)}=1.12$, $p>.05$] n'est pas significatif mais l'interaction (entraînement \times période) est significative [$F_{(2,30)}=3.43$, $p<.05$]. Les tests post-hoc de Newmans-keuls montrent, curieusement, que les enfants qui ont suivi l'entraînement VAM-biologique amélioraient

d'avantage leurs performances entre le prétest et le post-test que ceux qui ont suivi les entraînements HVAM et VAM ($p < .01$).

Tableau 4. Scores moyens et (écarts-types) dans les deux tâches métaphonémiques avant et après chaque entraînement.		
Tâche x Entraînement	Prétest	Post-test
Phonème initial (max.7)		
HVAM	3.90 (2.17)	6.00 (1.00)
VAM-biologique	3.45 (1.44)	5.36 (1.03)
VAM	4.36 (1.80)	5.90 (1.22)
Phonème final (max.7)		
HVAM	3.54 (1.04)	5.72 (1.10)
VAM-biologique	2.72 (1.56)	4.54 (1.37)
VAM	3.72 (1.42)	4.72 (1.62)

4.4 Discussion

L'objectif de cette recherche était de comprendre plus précisément le rôle respectif de la séquentialité et de l'exploration haptique des lettres en relief dans l'amélioration des performances en décodage. Pour répondre à cette question, nous avons comparé trois entraînements de préparation à la lecture : HVAM, VAM et VAM-biologique, auprès d'enfants en grande section de maternelle. Ces entraînements développaient de façon commune les capacités métaphonémiques des enfants mais différaient par les modalités sensorielles sollicitées (visuelle, auditive et haptique) ainsi que par la manière d'explorer les lettres (simultanée ou séquentielle). Pour l'entraînement VAM-biologique les lettres se dessinaient selon un mouvement naturel d'écriture. Nous avons mesuré les performances des enfants avant et après chaque type d'entraînement en utilisant deux tâches mesurant les capacités métaphonémiques (les tâches d'identification de phonème en position initiale et finale), une tâche de connaissance de lettres et enfin une tâche de décodage de pseudo-mots.

Nous avons observé un progrès des performances pour toutes les tâches administrées et après chaque entraînement. Ces résultats sont en accord avec les études précédentes qui montrent que les programmes qui développent à la fois les habilités d'analyse phonémique et la connaissance des lettres et des correspondances graphème-phonème favorisent la

compréhension et l'utilisation du principe alphabétique nécessaire au décodage des mots écrits (Castles & Coltheart, 2004 ; Ehri et al., 2001). Cependant, l'amplitude des progrès dépendait du type d'entraînement, c'est-à-dire du type de modalité sollicitée et de la manière d'explorer les lettres, mais également du type de connaissances évaluées. Ainsi, nous avons observé une amélioration similaire des performances après les trois entraînements pour les tâches métaphonémiques et la tâche d'identification de lettres, et une amélioration plus importante des performances pour la tâche de décodage de pseudo-mots après l'entraînement HVAM par rapport aux entraînements VAM et VAM-biologique.

Plus précisément, les trois types d'entraînements ont permis une augmentation similaire des performances entre les prétests et les post-tests pour les tâches métaphonémiques (à une exception près). Ce résultat s'explique par le fait que les activités proposées sont les mêmes quel que soit le type d'entraînement suivi par les enfants. Après les trois interventions, les enfants ont donc atteint un certain niveau d'habiletés métaphonémiques.

La tâche de décodage de pseudo-mots permet une évaluation du niveau de compréhension du principe alphabétique et de son utilisation. En effet, la réussite à cette tâche requiert l'application des correspondances graphème-phonème travaillées au cours des différentes sessions d'entraînement. A l'inverse, un échec à cette tâche suggère une difficulté à utiliser ces correspondances mais ne préjuge pas du niveau de compréhension du principe alphabétique. On constate que les performances des enfants ont significativement augmenté entre les prétests et les post-tests pour chaque entraînement. Cependant, l'entraînement HVAM donne lieu à de meilleures performances que l'entraînement VAM. Ce résultat montre, comme le suggèrent Bara et ses collègues (2004) et Gentaz et ses collaborateurs (2003), que l'exploration visuo-haptique et haptique des lettres serait plus efficace qu'une simple exploration visuelle pour comprendre et utiliser le principe alphabétique et par conséquent pour développer des habiletés de décodage chez les enfants. Cette interprétation générale découle indirectement des études qui montrent que les compétences métaphonémiques et la connaissance des lettres, en grande section de maternelle, constituent les meilleurs facteurs prédictifs de la réussite en lecture un an plus tard, soit au cours de la première année de lecture (Scarborough, 1998). C'est au cours de cette même année que l'on considère généralement que les habiletés de décodage des mots écrits se développent parmi lesquelles la procédure de décodage grapho-phonémique (voir par exemple, Sprenger-Charolles & Colé, 2003/2006).

Le résultat original de cette expérience réside dans les performances observées après l'entraînement HVAM : elles se révélaient supérieures à celles observées après l'entraînement VAM-biologique (qui ne différait pas significativement de l'entraînement VAM). Nous constatons que l'exploration visuelle séquentielle des lettres ne permet pas d'obtenir les mêmes effets bénéfiques que l'exploration haptique séquentielle même lorsque les lettres se dessinent en respectant les lois de production motrice. Comme le suggèrent Bara et ses collègues (2004), l'exploration manuelle des lettres effectuée par les enfants serait la caractéristique principale pouvant expliquer l'efficacité de l'entraînement HVAM.

Les résultats obtenus à la tâche d'identification de lettres montraient une amélioration similaire du nombre moyen de lettres cibles correctement identifiées pour les trois entraînements. Comme dans les précédentes études, l'ensemble des résultats suggère que l'entraînement HVAM (et son exploration haptique des lettres *per se*) aide les enfants à mieux associer les représentations orthographiques des lettres et les représentations phonologiques des sons correspondants, améliorant ainsi leurs capacités de décodage. Bien que les enfants identifient en moyenne le même nombre de lettres après les trois interventions, les enfants effectuant une exploration haptique étaient néanmoins capables d'utiliser la particularité de cet entraînement pour décoder les pseudo-mots. Le fait que l'entraînement HVAM améliorait le décodage de manière plus importante que ne le permettaient les deux autres types d'entraînements, concomitamment au fait qu'il ne bénéficiait pas plus spécifiquement à l'amélioration de la connaissance des lettres que ces derniers, ne permet pas de mettre en évidence l'existence d'un lien entre le niveau de décodage et une activation des représentations des lettres plus rapide et automatique. Il avait pourtant été proposé que l'utilisation de l'exploration haptique dans l'appréhension des lettres pourrait engendrer une meilleure mémorisation et identification des lettres. Dans cette perspective, Hulme (1981) suggère que l'exploration haptique des lettres implique un double codage en mémoire moteur et visuel. Ce double codage permettrait alors une activation plus rapide des représentations des lettres qui se sont développées à l'aide de multiples sources d'informations. Récemment, Longcamp *et al.* (2005) ont montré que lorsque des enfants de 5 ans sont entraînés à tracer manuellement des lettres, leur mémorisation et par conséquent leur identification sont facilitées. D'autres expériences suggèrent également un rôle facilitateur de la trace motrice sur la reconnaissance visuelle des lettres (Naka, 1998 ; Naka & Noia, 1995). Nous pouvons également nous interroger sur la tâche d'identification des lettres utilisée dans la présente étude. Il est possible que cette dernière constitue une mesure trop globale de la connaissance des lettres. Une évaluation plus appropriée devrait alors prendre en compte la précision de

l'identification des lettres mais aussi la rapidité à les identifier (Behrmann et al., 1998 ; Bonnefoy & Rey, 2008 ; Laberge & Samuels, 1974).

Cette étude permet de confirmer l'intérêt de l'ajout de la modalité haptique dans un entraînement de préparation à l'apprentissage de la lecture chez des enfants de grande section de maternelle. La conséquence la plus notable est son effet positif sur la compréhension et l'utilisation du principe alphabétique (niveau de décodage de pseudo-mots). Même si les trois types d'entraînements (visuel, visuel-biologique et visuo-haptique) permettent de nets progrès dans la connaissance des lettres et des sons, les résultats ne mettent pas en évidence d'effet positif supplémentaire de la séquentialité de l'exploration indépendamment des modalités sensorielles sollicitées. Ainsi, le rôle bénéfique de l'exploration haptique *per se* peut-être mis en avant.

Chapitre 5.

L'évaluation de la connaissance des lettres

Etude 2. La connaissance du nom et du son des lettres, habiletés métaphonémiques et capacités de décodage en grande section de maternelle

Cette étude a fait l'objet d'une publication sous la référence suivante (voir Annexe F) :

Hillairet de Boisferon, A., Colé, P., & Gentaz, E. (2010). Connaissance du nom et du son des lettres, habiletés métaphonémiques et capacités de décodage en grande section de maternelle. *Psychologie Française*, 55, 91-111.

5.1. Introduction

L'étude 1 nous a permis de conclure que les bénéfices d'un entraînement multisensoriel de préparation à l'apprentissage de la lecture, sur la compréhension et l'utilisation du principe alphabétique (niveau de décodage de pseudo-mots), étaient le fait des particularités de l'exploration haptique *per se*. Nous avons préalablement émis l'hypothèse que l'ajout de la modalité haptique manuelle dans une activité d'exploration des lettres puisse améliorer leur mémorisation et ainsi favoriser la connexion entre les représentations phonologiques et orthographiques, et en conséquence améliorer les performances en décodage. Nos résultats ne permettent pas d'établir un tel lien, bien que différents auteurs avancent néanmoins également cette idée (Hulme, 1981 ; Longcamp et al., 2005 ; Naka, 1998 ; Naka & Noia, 1995). Nous nous étions alors demandé si la tâche d'identification des lettres utilisée dans notre étude était suffisamment sensible pour discriminer les enfants sur cette compétence cruciale pour le décodage ; si elle ne constituait pas une mesure trop globale qui ne recouvrait pas toutes les dimensions de la connaissance des lettres (précision et rapidité).

Par ailleurs, il faut noter que la littérature décrit de façon plus robuste un lien entre les activités motrices autour des lettres et l'amélioration observée sur le niveau de lecture (Bara, 2005; Bara, et al., 2007; Bara, et al., 2004; Fernald & Keller, 1921; Gentaz, et al., 2003; Kirk, 1933). Les effets sur le niveau de la connaissance des lettres semblent moins systématiques et pourraient dépendre des tâches proposées pour l'évaluer. Dans nos entraînements, nous avons proposé une tâche d'identification de lettres où l'expérimentateur énonçait le nom d'une lettre

et l'enfant devait indiquer sur des planches, parmi d'autres lettres, la lettre qu'il avait entendue par une méthode de choix forcé (indiquer la lettre cible sur une planche parmi des lettres distractrices) ; cette tâche implique donc pour l'enfant de traduire un son sous sa forme écrite. Cependant, une tâche de dénomination de lettres, tout comme une tâche de décodage (lecture de pseudo-mots), consistent à traduire une lettre ou séquence de lettres en un son ou séquence de sons. Nous formulons alors l'hypothèse que les effets de l'ajout de la modalité haptique, pour explorer les lettres, pourraient se manifester de manière asymétrique dans les tâches de connaissance de lettres. Préalablement, nous proposons d'étudier les différentes tâches de connaissance des lettres et les liens qu'elles entretiennent avec les épreuves métaphonémiques que nous utilisons dans nos recherches, ainsi qu'avec la tâche de décodage de pseudo-mots.

L'objectif général de cette étude était d'étudier différentes tâches d'évaluation de la connaissance du nom des lettres avant l'acquisition de la lecture chez des enfants scolarisés en grande section de maternelle. De nombreuses études ayant souligné l'importance des connaissances phonologiques et orthographiques dans l'apprentissage de la lecture, nous nous sommes également intéressés aux liens existants entre ces différentes connaissances ainsi qu'aux liens qu'elles entretiennent avec le décodage.

Pour ce faire, nous avons proposé à 40 enfants, en décembre et en avril, des épreuves d'habiletés métaphonémiques (identification de phonème en position initiale et finale dans les mots), de connaissance du son et du nom des lettres (dénomination et identification) et une tâche de décodage de pseudo-mots. Pour les tâches de connaissance du nom des lettres, deux types de mesures ont été proposés : une mesure de précision (nombre de réponses correctes) et une mesure de rapidité (temps de réponse), reflet de l'automatisation de l'accès à cette connaissance. L'utilisation de temps de réaction, comme mesure de l'automatisation de la connaissance des lettres, a été préférée au RAN (*Rapid Automated Naming*). En effet, nous avons fait l'hypothèse qu'il s'agit d'une mesure plus directe de l'accès au nom des lettres car elle impliquerait moins fortement la variété des processus, attentionnels, visuels, phonologiques et articulatoires impliqués dans une tâche de RAN.

Dans cette étude, nous pensons montrer que la connaissance du nom des lettres a une importance fondamentale dans les étapes initiales de l'apprentissage de la lecture en influençant le développement des habiletés métaphonémiques et celui des correspondances grapho-phonémiques (chapitre 2.3.2.1). L'analyse des temps de réponse aux épreuves de connaissance du nom des lettres devrait révéler un lien entre les scores de rapidité et de

précision, qui devrait être plus important en avril lorsque les enfants connaissent davantage de lettres et que cette connaissance est aussi plus ancrée (stable). Dans un second temps, il est supposé que les enfants les plus performants dans chacune des épreuves alphabétiques et métaphonémiques seraient aussi les meilleurs décodeurs lors de la seconde phase d'évaluation. Dans ce cadre, nous pensons que la connaissance du nom des lettres influence fortement dès le début de l'année de grande section de maternelle les performances en décodage. Enfin, dès que l'utilisation de la connaissance des lettres serait suffisamment automatisée (au mois d'avril), les temps de réaction associés à cette connaissance pourraient également avoir une influence sur les performances de décodage.

5.2 Méthode

5.2.1 Participants

Quarante enfants (21 filles et 19 garçons) âgés en moyenne de 5 ans et 4 mois lors de la première session (de 4 ans et 11 mois à 5 ans et 11 mois) ont participé à cette étude. Ils étaient scolarisés dans deux classes de grande section de maternelle d'une école de Grenoble. Tous les enfants appartenaient à des milieux socio-économiques moyens. Quatre enfants ont été exclus de l'échantillon de départ, composé de 44 enfants, parce qu'ils n'ont pas pu participer aux deux sessions d'évaluation. Tous les enfants étaient de langue maternelle française.

5.2.2 Matériel et procédure

Les enfants étaient évalués individuellement dans une pièce de l'école isolée du bruit. Lors de la première session réalisée au mois de décembre, nous avons proposé une tâche de décodage de pseudo-mots, deux tâches d'habiletés métaphonémiques (identification de phonèmes en position initiale et finale dans les mots), une tâche de connaissance du son des lettres et enfin, nous avons recueilli deux scores de rapidité et deux scores de connaissance du nom des lettres (identification et dénomination). Cinq mois plus tard, lors de la deuxième session (avril), nous avons de nouveau proposé l'ensemble de la batterie d'évaluation.

Comme dans nos entraînements multisensoriels, nous avons choisi de travailler avec les lettres cursives de l'alphabet pour lesquelles les enfants pré-lecteurs et pré-scripteurs ne devraient pas, de fait, posséder une connaissance approfondie en début d'année. Mais, comme le préconise le bulletin officiel du 19 juin 2008, en maternelle, les enfants « [...] *apprennent*

progressivement le nom de la plupart des lettres de l'alphabet qu'ils savent reconnaître, en caractères d'imprimerie et dans l'écriture cursive, [...]. Pour une partie d'entre elles, ils leur associent le son qu'elles codent et le distinguent du nom de la lettre quand c'est pertinent. Les enfants découvrent ainsi le principe alphabétique, sans qu'il soit nécessaire de travailler avec eux toutes les correspondances. » Nous pensons donc pouvoir observer, plus facilement qu'avec les lettres capitales, l'évolution naturelle de la connaissance de ces lettres au cours des cinq mois de scolarisation. Concernant les épreuves qui évaluent les habiletés métaphonémiques et les capacités de décodage des enfants, nous avons choisi d'étudier les lettres *o, u, r, n, p* et *b* dont les fréquences relatives des phonèmes dans la langue française sont moyennes (*r* et *p*) à basses (*o, u, n* et *b*) (Rondal, 1997). De plus, nous avons choisi deux voyelles, deux consonnes de structure phonologique CV et deux consonnes de type VC.

5.2.2.1 Les tâches d'habiletés métaphonémiques

Pour chacune de ces tâches, des images en noir et blanc représentant des mots familiers et faciles à identifier étaient présentées (Annexe B). Chaque tâche était précédée de trois essais avec *feedback* afin de s'assurer que les enfants avaient bien compris la consigne.

Tâche d'identification de phonèmes en position initiale

Quatre images étaient présentées à l'enfant. À chaque essai l'expérimentateur montrait une première image, la posait sur la table et énonçait le mot qu'elle représentait. Ce premier mot était utilisé par l'enfant pour trouver parmi les trois autres images, celle qui correspondait au mot qui commençait par le même son. Par exemple, «orange» était le premier mot et l'enfant devait choisir parmi «mouton, olive, abeille ». Les différents essais portaient sur les six phonèmes cibles de l'étude. Un point par réponse correcte était attribué (note sur 6).

Tâche d'identification de phonèmes en position finale

Le même principe était utilisé à la différence que l'enfant devait retrouver le mot qui finissait par le même son que le mot présenté en premier. Par exemple, l'expérimentateur présentait le mot «vélo» et l'enfant devait choisir parmi les mots «chapeau, cerise, antenne». On attribuait un point par réponse correcte (note sur 6).

5.2.2.2 Les tâches de connaissance du nom des lettres

L'ordre de passage concernant les épreuves de connaissance du nom des lettres et de connaissance du son des lettres était le même pour tous les enfants. Nous commençons par

les tâches de dénomination du nom puis du son des lettres suivis par la tâche d'identification des lettres.

Tâche de dénomination des lettres cursives

Les 26 lettres cursives de l'alphabet (Figure 26) étaient présentées une à une sur un écran d'ordinateur dans un ordre aléatoire. Avant l'apparition de chaque lettre, on annonçait à l'enfant qu'il devait dire le plus rapidement possible le nom de la lettre qui allait apparaître à l'écran. Dès que l'enfant énonçait le nom de la lettre, l'expérimentateur enregistrait le temps de réponse en appuyant sur une clé réponse. Cette mesure fournissait un indice de l'automatisation de l'utilisation de la connaissance du nom des lettres. Un temps de réponse était donc recueilli pour chacune des réponses correctes. Des temps de réponse moyens par enfant étaient ensuite calculés pour les bonnes réponses pour les 26 lettres de l'alphabet (les temps de réponse moyens étaient calculés à partir de trois réponses sur les 26 demandées). Pour la première session, nous avons choisi d'écarter les temps de réponse inférieurs à 300 millisecondes (ms) et supérieurs à 8850 ms (i.e., les temps respectivement inférieurs et supérieurs à trois écarts-types par rapport à la moyenne des temps de réponse de l'ensemble des participants). Pour la seconde session, nous avons écarté les temps de réponse inférieurs à 300 ms et supérieurs à 6500 ms. Un score de précision de cette connaissance des lettres était aussi calculé. Un point était attribué par réponse correcte pour les 26 lettres de l'alphabet. Si l'enfant corrigeait sa première réponse, l'expérimentateur demandait confirmation à l'enfant avant de considérer la réponse comme correcte ou incorrecte (en cas de correction de la réponse, le temps de réponse n'était pas pris en compte).

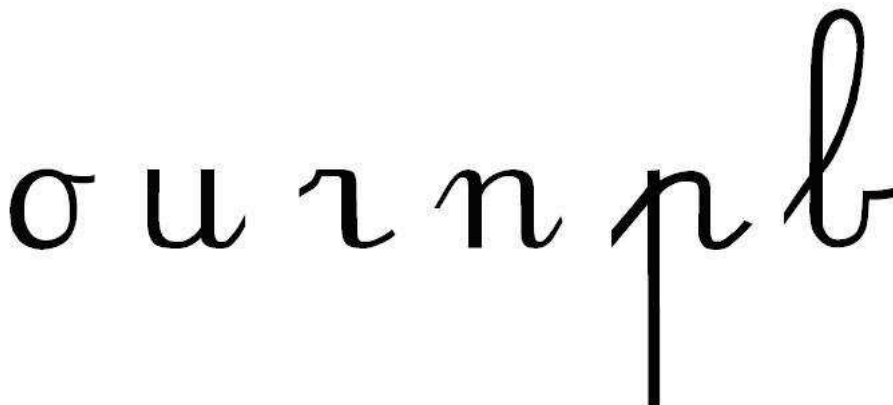


Figure 26. Exemple de lettres cursives utilisées dans la tâche de dénomination (réduction de 55% par rapport à la taille de présentation à l'écran).

Tâche d'identification des lettres cursives

L'expérimentateur énonçait le nom des 26 lettres de l'alphabet une par une dans un ordre aléatoire. Pour chaque lettre énoncée, l'enfant devait indiquer, le plus rapidement possible, en pointant sur un écran d'ordinateur, la lettre qu'il avait entendue. La lettre à identifier était représentée parmi trois autres lettres écrites en caractère cursif. A chaque essai, les lettres distractrices étaient : la représentation en miroir de la lettre énoncée, une lettre graphiquement proche et une lettre graphiquement éloignée¹¹ (voir Figure 27 pour un exemple). Chaque réponse correcte était notée un point. Si l'enfant corrigait sa première réponse, l'expérimentateur demandait confirmation à l'enfant avant de considérer la réponse comme correcte ou incorrecte (en cas de correction de la réponse le temps de réaction associé n'était pas pris en compte). Un score pour les 26 lettres de l'alphabet était calculé. L'objectif de cette première mesure était donc d'obtenir un score de précision lié à la connaissance du nom des lettres. L'informatisation de la tâche, permettait aussi de recueillir un temps de réaction, mesure de l'automatisme de l'accès à cette connaissance. En effet, dès la fin de l'annonce par l'expérimentateur de la lettre à pointer, les quatre lettres alignées apparaissaient simultanément à l'écran et lorsque l'enfant pointait une lettre, l'expérimentateur enregistrait le temps de réaction en appuyant sur une clé réponse. Un temps de réaction était donc recueilli pour chacune des réponses correctes pour les 26 lettres de l'alphabet. De la même manière que pour la tâche de dénomination, nous avons obtenu des temps réaction moyens pour les réponses correctes, par enfant, pour les 26 lettres. Pour la première session, nous avons choisi d'écarter les temps de réaction inférieurs à 500 ms et supérieurs à 9500 ms (i.e., les temps respectivement inférieurs et supérieurs à trois écarts-types par rapport à la moyenne des temps de réaction de l'ensemble des participants). Pour la seconde session, nous avons écarté les temps de réaction inférieurs à 500 ms et supérieurs à 10 s.

5.2.2.3 Tâche de connaissance du son des lettres

Les six lettres cibles de l'étude étaient de nouveau présentées dans un ordre aléatoire à l'enfant qui devait donner le son de la lettre s'il le connaissait. Un point était attribué par réponse correcte (note sur 6).

¹¹ Les fréquences d'associations moyennes subjectives, sur la base de la similarité de la forme des lettres, était de 0.71 ± 0.25 pour les couples lettre énoncée/distracteur graphiquement similaire et de 0.09 ± 0.09 pour les couples lettre énoncée/distracteur graphiquement dissimilaire (d'après Chartrel, 2006).

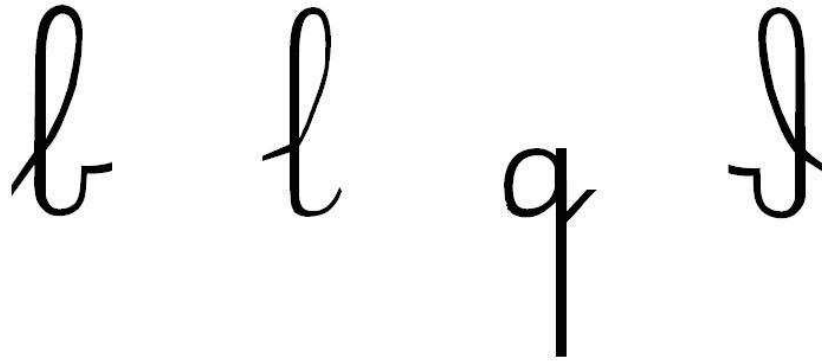


Figure 27. Exemple de lettres cursives utilisées dans la tâche d'identification de lettres (réduction de 50 % par rapport à la taille de présentation à l'écran).

5.2.2.4 Tâche de décodage de pseudo-mots

Les pseudo-mots étaient composés uniquement des lettres cibles de l'étude (Annexe B). Il était précisé aux enfants que les mots étaient inventés. Quatre des 12 pseudo-mots présentés étaient composés de deux lettres (par exemple /ro/), quatre de trois lettres (par exemple /opu/) et quatre de quatre lettres (par exemple /nubo/). Un point était attribué pour chaque pseudo-mot lu correctement (note sur 12).

5.3 Résultats

Nous avons analysé, dans un premier temps, l'évolution des performances obtenues pour chacune des épreuves administrées entre les sessions de décembre et d'avril (*t* de Student). Dans un second temps, nous avons procédé à des analyses corrélationnelles (coefficient de corrélation *r* de Bravais-Pearson) entre les différents indicateurs des compétences alphabétiques et métaphonémiques précoces, à la session de décembre et d'avril (mesures intrasession) et entre les sessions (mesures intersessions). Enfin, nous avons examiné les liens entre le niveau de décodage de pseudo-mots et les compétences alphabétiques et métaphonémiques. Pour cette analyse, nous avons préalablement regroupés les enfants en fonction de leur niveau de décodage en avril et nous avons comparé (test *t* de Student) leurs performances aux épreuves alphabétiques et métaphonémiques mesurées en décembre et en avril.

5.3.1 Evolution des performances de décembre à avril

Pour apprécier l'évolution des performances entre la première et la seconde session, nous avons effectué une série de test *t* de Student pour chacune des épreuves de la batterie

d'évaluation (Tableau 5). La plupart des tests sont significatifs. Ainsi, à la session d'avril, les enfants obtenaient de meilleures performances, par rapport à la session de décembre, en lecture de pseudo-mots et en identification de phonème en position initiale et finale dans les mots. De même, ils identifiaient ou dénommaient davantage de lettres en avril et les temps mis pour dénommer le nom des lettres étaient aussi plus courts. Enfin, les enfants connaissaient mieux le son des lettres en avril par rapport à décembre. Seuls les temps mis pour identifier les lettres à partir de leurs noms n'évoluaient pas entre les deux sessions.

Tableau 5. moyennes et écarts-types moyens par session pour chaque compétence évaluée.

Indices	Décembre		Avril		p
	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	
Pseudo-mots (/12)	0.45	1.09	2.40	3.07	< .001
Identification de phonème (/12)	7.48	2.54	9.28	1.96	< .001
Phonème initial (/6)	4.30	1.42	4.95	0.99	< .01
Phonème final (/6)	3.18	1.5	4.33	1.27	< .001
Identification lettres (/26)	9.28	3.62	12.93	4.50	< .001
TR identification (ms)	3246	901	3444	1169	.36
Dénomination lettres (/26)	8.35	4.64	13.85	6.42	< .001
TR dénomination (ms)	2546	637	2135	527	< .01
Son des lettres (/6)	1.45	1.75	3.95	2.03	< .001

Note : TR = Temps de réponse ; p= probabilité associée au test de la différence entre les moyennes de la session de décembre et d'avril (t de Student).

5.3.2 Analyses corrélationnelles intra session

5.3.2.1 Les compétences alphabétiques et métaphonémiques précoces

Tableau 6. corrélations intra-sessions entre les scores aux différentes compétences alphabétiques et métaphonémiques.

Indices	1	2	3	4	5	6	7
1 Phonème initial (/6)		.52*** ^a	.54*** ^a	—	.36* ^a	—	.13 ^a
2 Phonème final (/6)	.51*** ^b		.46** ^a	—	.36* ^a	—	.19 ^a
3 Identification lettres (/26)	.26 ^b	.34* ^b		-.12 ^a	.77*** ^a	—	.52*** ^a
4 TR identification (ms)	—	—	.03 ^b		—	.26 ^a	—
5 Dénomination lettres (/26)	.30 ^b	.27 ^b	.49*** ^b	—		-.16 ^a	.69*** ^a
6 TR dénomination (ms)	—	—	—	.66*** ^b	-.56*** ^b		—
7 Son des lettres (/6)	.41** ^b	.54*** ^b	.43** ^b	—	.50*** ^b	—	

* significatif à p<.05 ; ** significatif à p<.01 ; *** significatif à p<.001

Note : TR = Temps de réponse. ^a Les intercorrélations pour la première session de décembre. ^b Les intercorrélations pour la session d'avril.

Pour la session de décembre, nous constatons que toutes les performances aux tâches alphabétiques et métaphonémiques ne sont pas significativement corrélées (Tableau 6^a). Le patron de résultats observé est le suivant. Les habiletés métaphonémiques, telles que mesurées par les tâches d'identification de phonème en position initiale et finale dans les mots, sont liées entre elles [$r=.52$, $p<.001$]. Les scores de précision aux épreuves de la connaissance du nom des lettres (dénomination et identification) le sont également [$r=.77$, $p<.001$]. De plus, les scores correspondants aux deux tâches d'habiletés métaphonémiques sont chacun significativement corrélés aux scores correspondants aux deux tâches de la connaissance du nom des lettres. Le coefficient de corrélation moyen est de .43. Enfin, les scores de connaissance du son des lettres ne sont pas corrélés aux mesures d'habiletés métaphonémiques mais sont significativement corrélés aux scores de précision correspondants aux deux épreuves de la connaissance du nom des lettres (coefficient de corrélation moyen entre ces trois épreuves, $r=.61$). Les enfants qui possédaient une bonne connaissance du nom des lettres avaient également tendance à bien connaître le son des lettres.

Pour la session d'avril, nous observons quasiment le même coefficient de corrélation entre les scores aux deux tâches d'habiletés métaphonémiques qu'en décembre [$r=.51$, $p<.001$] (Tableau 6^b). La corrélation entre les scores aux deux épreuves de la connaissance du nom des lettres est toujours significative mais différente de celle observée en décembre, passant de .77 à .49. Des modifications mineures sont aussi à noter pour les corrélations qui concernent l'épreuve de connaissance du son des lettres. Comme lors de la session de décembre, la connaissance du son des lettres est liée à la connaissance du nom des lettres (identification et dénomination) avec un coefficient de corrélation moyen entre leurs scores qui passe de .61 à .48. Des variations plus importantes concernent le lien entre la connaissance du son des lettres et les habiletés métaphonémiques. Les scores à ces épreuves corrélaient maintenant de manière significative (coefficient moyen de $r=.48$). Enfin, les corrélations entre les scores aux tâches d'habiletés métaphonémiques et de la connaissance du nom des lettres ne sont plus significatives excepté pour les scores d'identification des lettres et d'identification de phonème en position finale dans les mots [$r=.34$, $p<.05$].

5.3.2.2 La connaissance du nom des lettres : précision et rapidité

A la session de décembre, les mesures de rapidité et de précision de la connaissance du nom des lettres ne sont pas corrélées. De même, les temps de dénomination et d'identification des lettres ne corrélaient pas entre eux. A la session d'avril, seuls les scores de dénomination

sont négativement corrélés à leurs temps de réponse [$r = -.56$, $p < .001$]. Plus les enfants dénommaient de lettres et plus ils le faisaient rapidement. Enfin, les deux mesures de rapidité de la connaissance du nom des lettres sont corrélées [$r = .66$, $p < .001$].

5.3.3 Analyses corrélationnelles intersessions

5.3.3.1 Les compétences alphabétiques et métaphonémiques précoces

Tableau 7. corrélations intersessions entre les scores aux différentes compétences alphabétiques et métaphonémiques.							
Indices	1	2	3	4	5	6	7
1 Phonème initial (/6)	.36*	.43**	.16	—	.41**	—	.35*
2 Phonème final (/6)	.49***	.47**	.33*	—	.35*	—	.46**
3 Identification lettres (/26)	.46**	.49***	.45**	-.54***	.63***	—	.58***
4 TR identification (ms)	—	—	-.11	.15	—	-.21	—
5 Dénomination lettres (/26)	.50***	.42**	.55***	—	.63***	-.47**	.57***
6 TR dénomination (ms)	—	—	—	-.08	-.04	-.08	—
7 Son des lettres (/6)	.27	.28	.30	—	.63***	—	.58***
* significatif à $p < .05$; ** significatif à $p < .01$; *** significatif à $p < .001$							

Note : Les indices en colonne correspondent à la session de décembre. Les indices en ligne correspondent à la session d'avril.
TR = Temps de réponse.

Pour chaque épreuve (Tableau 7), le coefficient de corrélation, calculé entre les scores de décembre et d'avril, est positif et significatif (de $r = .36$ à $r = .63$). De plus, comme nous l'avons vu précédemment les performances augmentaient dans la période de cinq mois entre les sessions. Les enfants amélioraient donc leurs performances entre décembre et avril pour l'ensemble des épreuves et la manière dont se classaient les individus au sein des épreuves était proche pour ces deux périodes. Les performances aux épreuves mesurant les mêmes habiletés sont aussi corrélées entre décembre et avril. Les scores aux deux tâches d'habiletés métaphonémiques (en moyenne $r = .46$) et les scores aux deux tâches de connaissance du nom des lettres (en moyenne $r = .59$) sont respectivement liés. De manière plus intéressante, les deux scores de connaissance du nom des lettres (identification et dénomination), mesurés en décembre, corrélaient de manière quasi équivalente avec les scores aux deux tâches d'habiletés métaphonémiques en avril (en moyenne, $r = .48$). Cependant, l'inverse n'est pas tout à fait vrai, puisque les scores à la tâche d'identification de phonèmes en position initiale, mesurés en décembre, ne corrélaient pas avec les scores d'identification en avril. Enfin, les scores de connaissance du son des lettres, en décembre, corrélaient uniquement avec les scores de

dénomination en avril [$r=.63$, $p<.001$]. Toutefois, l'ensemble des autres mesures (connaissance du nom des lettres et habiletés métaphonémiques), relevé en décembre, corrèle avec les scores de connaissance du son des lettres en avril ($r=.35$ à $r=.58$), avec un coefficient de corrélation plus élevé pour les scores de connaissance du nom des lettres (en moyenne, $r=.58$) que pour les scores d'habiletés métaphonémiques (en moyenne, $r=.41$). Ce sont les enfants les plus capables de manipuler les phonèmes des mots parlés (habiletés métaphonémiques), de dénommer et d'identifier les lettres en décembre qui obtenaient les meilleures performances dans la tâche de connaissance du son des lettres en avril.

5.3.3.2 La connaissance du nom des lettres : précision et rapidité

Les corrélations intersessions entre les scores de rapidité pour chacune des tâches de connaissance du nom des lettres ne sont pas significatives (voir diagonale du Tableau 7). De même, les temps d'identification de lettres ou de dénomination, mesurés en décembre, ne permettent pas d'estimer les scores de précision ni la rapidité d'identification ou de dénomination de lettres qui seront recueillis en avril. Cependant, nous obtenons des coefficients de corrélation négatifs et significatifs entre les différentes tâches de connaissance du nom des lettres, proposées en décembre et leurs mesures respectives de rapidité en avril (en moyenne, $r=-.51$). Plus les enfants connaissaient de noms de lettres en moyenne en décembre et plus celles-ci avaient tendance à être reconnues rapidement en avril.

5.3.4 Analyse des liens entre compétences alphabétiques, métaphonémiques et décodage de pseudo-mots.

Afin d'étudier les liens entre les différentes compétences alphabétiques, métaphonémiques et les capacités de décodage, nous avons constitué deux groupes d'enfants sur la base de leurs performances en décodage de pseudo-mots mesurées en avril. Le groupe dit « décodeur » regroupe les 15 enfants qui avait obtenu les meilleurs scores (supérieurs à $Q_{(p=0.6)}=2$) en décodage de pseudo-mots en avril ($m=5.53$, $ET=2.88$). Le groupe dit « non-décodeur » regroupe les 17 enfants qui avaient obtenu les moins bons scores ($Q_{(p=0.4)}=0$) en décodage de pseudo-mots en avril ($m=0$). Nous avons ensuite comparé les performances intra-session pour chaque épreuve entre le groupe d'enfants décodeurs et non-décodeurs à l'aide de test t de Student (Tableau 8).

Tableau 8. moyennes et (écarts-types moyens) par session pour l'ensemble des compétences alphabétiques et métaphonémiques en fonction du niveau de décodage en avril.

Niveau de décodage de pseudo-mots en avril				
Décembre	Indices	Non-décodeurs	Décodeurs	<i>p</i>
	Phonème initial (/6)	3.71 (1.36)	5.13 (1.19)	<.01
	Phonème final (/6)	2.35 (1.22)	4.00 (1.51)	<.01
	Identification lettres (/26)	6.94 (2.33)	11.73 (3.65)	<.001
	TR identification (ms)	3234 (1171)	3177 (637)	.87
	Dénomination lettres (/26)	5.35 (2.76)	11.87 (4.44)	<.001
	TR dénomination (ms)	2423 (668)	2561 (430)	.51
	Son des lettres (/6)	0.59 (0.80)	2.40 (2.23)	<.01
Avril	Indices	Non-décodeurs	Décodeurs	<i>p</i>
	Phonème initial (/6)	4.35 (1.00)	5.60 (0.74)	<.001
	Phonème final (/6)	3.59 (1.12)	5.13 (1.06)	<.001
	Identification lettres (/26)	10.47 (3.5)	14.67 (4.13)	<.01
	TR identification (ms)	3893 (1354)	2965 (719)	<.05
	Dénomination lettres (/26)	10.53 (5.75)	17.93 (5.46)	<.001
	TR dénomination (ms)	2328 (615)	1941 (413)	.056
	Son des lettres (/6)	2.18 (1.67)	5.40 (0.74)	<.001

Note : TR = Temps de réponse ; *p*= probabilité associée au test de la différence entre les moyennes des décodeurs et non-décodeurs (*t* de Student).

5.3.4.1 Session de décembre

Les tests *t* de Student révèlent que les enfants décodeurs en avril obtenaient en décembre des performances d'habiletés métaphonémiques significativement supérieures aux enfants non décodeurs. Concernant le lien entre la connaissance du son des lettres et les capacités de décodage, les enfants décodeurs connaissaient en décembre significativement plus de son de lettres que les enfants non décodeurs. Enfin, les enfants décodeurs en avril obtenaient, dès décembre, les meilleurs scores dans les épreuves de connaissance du nom des lettres. Ce sont pour les épreuves de dénomination et d'identification des lettres que nous notons les écarts de scores les plus importants entre les enfants décodeurs et non décodeurs. Les enfants décodeurs dénommaient en moyenne 6.52 lettres de plus que les enfants non décodeurs et identifiaient en moyenne 4.79 lettres de plus. Cependant, même si les enfants décodeurs avaient un niveau de connaissance du nom des lettres supérieur à celui des non décodeur, cette différence ne se traduisait pas par des temps de dénomination ou d'identification plus courts.

5.3.4.1 Session d'avril

Comme précédemment, les enfants décodeurs en avril obtenaient des performances d'habiletés métaphonémiques significativement supérieures aux enfants non décodeurs. De même, les enfants décodeurs connaissaient significativement plus de son de lettres que les enfants non décodeurs. Les enfants décodeurs en avril obtenaient aussi les meilleurs scores dans les épreuves de connaissance du nom des lettres. Ce sont de nouveau pour les épreuves de dénomination et d'identification des lettres que nous notons les écarts de scores les plus importants entre les enfants décodeurs et non décodeurs. Les enfants décodeurs dénommaient en moyenne 7.4 lettres de plus que les enfants non décodeurs et identifiaient en moyenne 4.2 lettres de plus. Enfin, les enfants décodeurs, comparativement aux enfants non décodeurs, identifiaient les lettres plus rapidement. Cependant, cette différence n'était pas due qu'à un gain significatif de rapidité des enfants décodeurs mais plutôt à l'association de ce gain à la légère augmentation des temps d'identification observée chez les enfants non décodeurs. Enfin, nous observons une tendance chez les enfants décodeurs à dénommer les lettres plus rapidement que les enfants non décodeurs.

Toutefois, afin d'étayer ces résultats, il est important de noter qu'il existe, selon le niveau de décodage des enfants, des différences intrasession entre les performances aux épreuves d'identification de phonèmes en position initiale et finale dans les mots et entre les performances aux épreuves de dénomination et d'identification. En effet, en décembre les enfants décodeurs [$t_{(13)}=4.22$, $p<.001$] et non-décodeurs [$t_{(15)}=3.41$, $p<.01$] identifiaient davantage de phonèmes en position initiale dans les mots que de phonèmes en position finale. En avril, pour les enfants décodeurs, cette différence n'était plus significative [$t_{(13)}=1.61$, $p>.05$] alors que les enfants non-décodeurs identifiaient toujours davantage de phonèmes en position initiale dans les mots que de phonèmes en position finale [$t_{(15)}=2.35$, $p<.05$]. Cette différence de profils en avril semble être due au nombre plus important de performances plafond dans les tâches d'identification de phonèmes en position initiale ou finale par les enfants décodeurs (respectivement 11/15 et 7/15) par rapport aux enfants non décodeurs (respectivement 3/17 et 1/17). Les résultats les plus intéressants concernent les épreuves de la connaissance du nom des lettres. Pour le groupe « décodeurs », les performances de dénomination sont quasiment équivalentes aux performances d'identification de lettres en décembre [$t_{(13)}=0.21$, $p>.05$] mais significativement supérieures en avril [$t_{(13)}=3.44$, $p<.01$]. Pour le groupe « non décodeurs », les enfants identifiaient davantage de lettres en décembre qu'ils n'en dénommaient [$t_{(15)}=2.35$, $p<.05$] puis en avril les performances devenaient

similaires pour les deux épreuves [$t_{(15)}=0.05$, $p>.05$]. Enfin, concernant les temps de réponses associés aux tâches de connaissance du nom des lettres, seules les vitesses de dénomination augmentaient entre décembre et avril et uniquement pour les enfants décodeurs [$t_{(13)}=3.68$, $p<.01$].

5.4 Discussion

Cette étude, réalisée chez des enfants prélecteurs scolarisés en grande section de maternelle, a permis d'observer deux grands ensembles de résultats. Le premier concerne les liens entre les différentes compétences alphabétiques et métaphonémiques, considérées comme prédictrices des futures habiletés en lecture, mesurées en décembre et avril de la même année scolaire. Nous pensons qu'au début de l'apprentissage du système alphabétique, les habiletés métaphonémiques pourraient se développer en s'appuyant sur la connaissance des premiers types d'associations arbitraires entre l'écrit et l'oral, en l'occurrence, l'association entre la lettre et son nom (Morais, et al., 1986; Read, et al., 1986). En effet, les performances aux tâches de conscience métaphonémique sont corrélées à celles évaluant la connaissance du nom des lettres en décembre, ce qui n'est quasiment plus le cas en avril. De plus, la connaissance du nom des lettres en décembre est liée aux habiletés métaphonémiques en avril. Par la suite, au cours de la scolarisation, la conscience phonémique se développerait plus directement en lien avec l'apprentissage de la lecture et notamment celui des associations lettre-son.

Par ailleurs, nous observons dès décembre une importante corrélation entre les scores de connaissance du son et du nom des lettres, alors qu'il faut attendre avril pour l'observer avec les scores d'habiletés métaphonémiques. Comme le démontre Share (2004), la connaissance du son des lettres pourrait être favorisée par l'apprentissage préalable du nom des lettres. Dans les premiers temps de la scolarisation, les lettres sont le plus souvent présentées par leur nom (un nom pour une lettre) plutôt que par leur son (pas de correspondance unique lettre-son). Les enfants qui connaissent donc préférentiellement le nom des lettres en début d'année pourraient utiliser cette connaissance pour deviner leur son (Treiman & Kessler, 2003), à la condition que le son soit contenu dans le nom. Dans ce sens, connaître un nombre important de sons en début d'année serait plutôt le fait d'enfants possédant également de bonnes capacités de dénomination des lettres en décembre et avril.

Ces premiers résultats corrélationnels semblent confirmer le statut particulier de la connaissance du nom des lettres dans l'apprentissage initial de la langue écrite. Elle semble à

la fois en lien avec le développement des habiletés métaphonémiques et avec l'acquisition des associations lettres-sons.

Afin de préciser le développement de la connaissance du nom des lettres, nous avons proposé deux mesures de précision de cette connaissance et des mesures d'automatisation de son utilisation. Il faut noter que le coefficient de corrélation entre les scores de dénomination et d'identification des lettres diminue entre décembre et avril. Les deux tâches pourraient refléter des compétences différentes. Les temps de réaction moyens ne sont pas corrélés aux scores moyens de précision avant la fin d'année. C'est lorsque que les enfants connaissent suffisamment de lettres qu'une certaine rapidité d'utilisation de cette connaissance pouvait être observée. Ce sont les enfants qui dénommaient ou identifiaient le plus de lettres en décembre qui le faisaient aussi le plus rapidement en avril. L'automatisation de l'accès à cette connaissance serait donc liée à un certain niveau de son développement. Bien que le recueil de temps de réaction permette d'évaluer plus précisément l'automatisme de l'activation des représentations des lettres, le recours à la tâche d'identification pourrait se révéler moins pertinent. En effet, pour réaliser cette tâche, d'autres facteurs, notamment l'exploration visuelle organisée et attentive du matériel, ou encore le fait de devoir pointer avec le doigt les lettres, pourraient influencer la mesure de rapidité. La question qui se pose alors est celle de l'utilisation d'une tâche d'identification comme mesure satisfaisante du développement de la connaissance du nom des lettres. Ces résultats justifieraient sans doute l'utilisation d'un test d'identification de lettre en choix forcé (réponses « oui » ou « non ») suite à une question du type « est-ce un a » ? Néanmoins, la tâche d'identification telle que nous la proposons aurait un intérêt dans l'étude des erreurs d'identification.

Le second ensemble de résultats concerne les liens entre les compétences alphabétiques et métaphonémiques et les capacités de décodage en avril. La comparaison des performances entre le groupe d'enfants décodeurs et non-décodeurs en avril montre que les enfants qui obtenaient les meilleurs scores en décodage de pseudo-mots possédaient aussi les meilleures habiletés métaphonémiques, les meilleurs scores de connaissance du son des lettres et identifiaient et dénommaient davantage de lettres en décembre et en avril. De plus, c'est sur la connaissance du nom des lettres que les deux groupes d'enfants se différencient le plus dès décembre avec un net avantage pour les enfants décodeurs. Au sein du groupe d'enfants décodeurs, ce sont plus particulièrement les performances en décodage qui sont les plus liées aux performances de décodage. Nous pouvons donc supposer que la connaissance du nom des lettres favorise directement la découverte des correspondances graphème-phonème,

notamment parce que la plupart des lettres contient dans leur nom le phonème qu'il représente (23 des 26 lettres de l'alphabet en français). Ce résultat est toutefois différent de celui de Schatschneider et ses collaborateurs (2004) qui montraient que le lien entre la connaissance du nom des lettres et la lecture diminuait dès la fin de la grande section de maternelle. L'utilisation de lettres cursives plutôt que de lettres capitales, pour les épreuves de dénomination et d'identification, éviterait un trop grand nombre de performances plafonds dans notre étude.

En prenant en compte l'ensemble des résultats de l'étude, nous proposons le schéma suivant : la connaissance du nom des lettres permettrait à la conscience phonémique de se développer et influencerait l'apprentissage des associations lettres-sons. Au début de l'apprentissage, la connaissance du nom des lettres pourrait donc influencer indirectement le niveau de lecture, via l'amélioration des habiletés métaphonémiques et de la connaissance du son des lettres.

Par ailleurs, la comparaison des performances des enfants décodeurs et non décodeurs n'a pas permis de mettre en évidence l'existence d'un lien entre la rapidité de l'utilisation de la connaissance du nom des lettres et les capacités de décodage en avril. Nous observons uniquement que la vitesse moyenne de dénomination augmente entre décembre et avril pour les enfants décodeurs. Il semblerait donc que le recueil d'un temps de réaction soit pertinent pour évaluer précisément la connaissance des lettres à défaut de prédire les futures performances en décodage. De plus, les différences observées entre les épreuves de dénomination et d'identification de lettres posent la question de la manière de mesurer le processus de reconnaissance rapide des lettres. En effet, la tâche de dénomination consiste en la présentation d'éléments discrets alors que la tâche d'identification proposerait des informations simultanées (plusieurs lettres présentées en même temps à l'écran). Cette différence méthodologique a été étudiée en comparant l'importance du RAN et de mesures de dénomination rapide discrète dans les compétences en lecture (P. G. Bowers & Swanson, 1991). Les résultats indiquent que ces deux mesures d'automatisme semblent importantes dans l'activité de lecture, mais que des épreuves telles que le RAN permettraient de mieux détecter les mauvais lecteurs. De plus, il faut noter que dans de nombreuses recherches, le RAN a souvent été fortement associé à des mesures de temps de lecture et plus rarement aux mesures associées de précision de cette lecture. Dans ce cadre, la fluence en lecture pourrait être considérée comme une extension de la dénomination rapide (Schatschneider, Carlson, Francis, Foorman, & Fletcher, 2002) et la dénomination rapide comme un moyen de prédire

la fluence de la lecture. Dans ce sens, Bonnefoy et Rey (2008) ont montré, chez des enfants scolarisés en CP, que les temps de dénomination de lettres isolées expliquent une part de variance unique du temps de lecture de mots. Cependant, une lecture fluente, bien que correspondant à un décodage rapide, implique aussi un décodage précis des mots. Dans notre étude, nous ne nous sommes pas intéressés aux mesures de rapidité de la lecture mais davantage à une mesure de précision du décodage. En fin de grande section de maternelle, avant l'entrée dans l'apprentissage formel, il semble plus pertinent de s'intéresser à la précision du décodage en cours d'acquisition plutôt qu'à une mesure de son automatisisation. Contrairement à nos hypothèses, nous n'avons pas observé de lien entre la précision du décodage en avril et les temps de dénomination ou d'identification des lettres. Toutefois, avant de parvenir à une lecture fluente, l'ensemble des processus intervenant dans cette activité doivent eux-mêmes être précis et rapides (Wolf & Katzir-Cohen, 2001). C'est pourquoi, et au regard de nos résultats, au-delà des mesures de précision, il semble important de prendre en compte des mesures de rapidité d'accès aux représentations des lettres, notamment la vitesse de dénomination du nom des lettres, compétence clé au début de l'acquisition de la lecture.

Cette étude confirme l'importance, dans les premiers temps de l'apprentissage de la lecture, des habiletés métaphonémiques, de la connaissance du son des lettres et principalement de la connaissance du nom des lettres. Selon Laberge et Samuels (1974), l'efficacité des différents processus impliqués dans la lecture dépend non seulement de leur précision mais également de leur automatisisation. Dans ce sens, la connaissance du nom des lettres et plus particulièrement la capacité à les dénommer rapidement semble être l'élément le plus important et discriminant pour l'acquisition de la lecture.

Chapitre 6.

Exploration haptique de lettres et qualité des tracés

Etude 3. Evaluation de l'ajout d'un dispositif haptique dans l'exploration des lettres cursives sur la fluidité de l'écriture en grande section de maternelle

Cette étude a fait l'objet d'une publication sous la référence suivante (voir Annexe G) :

Palluel-Germain, R., Bara, F., Hillairet de Boisferon, A., Hennion, B., Gouagout, P. & Gentaz, E. (2007). A visuo-haptic device - Telemaque - increases the kindergarten children's handwriting acquisition. IEEE WorldHaptics, 72-77.

6.1 Introduction

Dans cette nouvelle étude, nous souhaitons apporter de nouveaux arguments en faveur de l'introduction précoce de la modalité haptique pour explorer les lettres, en proposant d'évaluer son effet sur la qualité de leurs tracés. L'enseignement de l'écriture a pour objectif d'apprendre aux enfants la forme visuelle des lettres ainsi que la manière des les former, et de permettre l'automatisation des processus grapho-moteurs impliqués dans la transcription des textes écrits. Toutefois, nous avons vu que le geste d'écriture est un geste particulièrement complexe qui nécessite une certaine maturité du système moteur et qui est gouverné par de nombreuses règles de production (chapitre 2.1.2). L'apprentissage de la dynamique et de l'ordre de production (grammaire de l'action) spécifique à chaque lettre n'est possible que suite à un enseignement systématique et formel dispensé pendant plusieurs années (de la maternelle avec l'écriture du prénom de l'enfant jusqu'à la fin de la primaire avec les premiers signes de personnalisation de l'écriture). Bien que les règles de production écrites émergent avec le début de l'apprentissage, elles se mettent en place progressivement et nécessitent un entraînement intensif avant de se stabiliser avec l'âge. Au fur et à mesure de l'apprentissage, des différences aussi bien quantitatives (vitesse) que qualitatives (lisibilité) apparaissent et sont gage de son évolution.

Dans l'étude 1, nous avons vu que proposer une exploration haptique de lettre dans le cadre d'un entraînement de préparation à la lecture permettait de favoriser la mise en place et l'utilisation des correspondances grapho-phonémique chez les jeunes enfants. Malgré une

absence d'effet sur la mémorisation des lettres, un des intérêts de l'entraînement haptique serait d'initier l'enfant au geste moteur nécessaire pour réaliser les lettres. En effet, les enfants effectuaient sous contrôle de l'expérimentateur, une exploration haptique des lettres dans le sens de l'écriture. Ainsi, un effet bénéfique de l'exploration haptique des lettres sur la qualité de leur tracé devrait-être observé.

Les avancées technologiques et la démocratisation des dispositifs haptiques à retour de force nous permettent d'envisager de nouvelles méthodes pour l'apprentissage de l'écriture en fournissant des informations haptiques supplémentaires durant les phases d'apprentissage moteur. Une interface haptique permettant de guider via un bras robotisé un stylet le long d'une lettre a été mise au point. Cette interface permet d'apprendre aux enfants à reproduire une lettre selon un standard qui n'est pas seulement statique (forme correcte) mais aussi dynamique (règles de production motrice).

L'objectif de cette recherche est d'étudier, chez des enfants de grande section de maternelle, les effets de l'ajout d'une exploration haptique de lettres cursives virtuelles dans un entraînement de préparation à l'écriture sur la fluidité de la production des lettres. Les enfants ont été soumis à deux entraînements impliquant soit un dispositif haptique (groupe expérimental visuo-haptique, VH) ou non (groupe contrôle, C). La fluidité de l'écriture a été évaluée pour six lettres cursives (a, b, f, i, l, s) avant et après les deux interventions grâce à des paramètres cinématiques de production (vitesse moyenne, nombre de pics de vitesse, et nombre de levers de crayons).

Nous formulons l'hypothèse générale que l'entraînement VH, notamment parce que le geste de l'enfant pour tracer la lettre est guidé par le dispositif dans la bonne direction (exploration semi-passive) et la bonne dynamique (exploration passive), devrait entraîner une amélioration plus importante de la fluidité de l'écriture par rapport à un entraînement contrôle, où l'enfant aura à planifier, générer et contrôler seul son mouvement. Plus spécifiquement, nous nous attendons à ce que le mouvement de production soit plus rapide et présente un moins grand nombre de pics de vitesse et de levers de crayons après l'entraînement impliquant le dispositif haptique qu'après l'intervention contrôle (sans interface).

6.2 Méthode

6.2.1 Participants

Quarante-deux enfants, âgés de 5.1 à 6.1 ans au début de l'étude (20 garçons et 22 filles, $m=5.5$ ans), scolarisés dans une école maternelle de Grenoble, ont participé à cette étude. Tous les participants étaient de langue maternelle française et aucun ne faisait état de besoins éducatifs particuliers.

6.2.2 Matériel et procédure

6.2.2.1 Prétests et post-tests

Entre une et deux semaines avant et après les séances d'entraînement, les enfants étaient évalués individuellement afin de mesurer leurs performances en écriture. Ces deux sessions étaient réalisées par le même expérimentateur. Les enfants étaient assis confortablement devant une table sur laquelle une tablette graphique (Wacom[®]) était placée. Pour ce système de mesure, les positions du crayon sont échantillonnées à une fréquence de 50 Hz et une résolution spatiale d'environ 0.1 mm. Une feuille blanche était placée sur la tablette graphique et le stylo utilisé pour écrire était un stylo à bille (Intuos Ink Pen, Wacom[®]) qui permet donc à l'enfant d'obtenir des feedbacks visuels sur son tracé. Après une phase de familiarisation, où il était demandé aux enfants d'écrire sur le papier leur prénom et de produire un dessin, ils devaient copier six lettres cursives (*a*, *b*, *f*, *i*, *l*, *s*). Ces lettres ont été choisies en accord avec les enseignants et dans le but de proposer certaines lettres «difficiles» à produire (e.g., la lettre *f*) et certaines plus faciles (e.g., la lettre *l*). Chaque modèle de lettre était présenté séparément sur un papier placé devant l'enfant. Il n'existait pas de contrainte de temps ni de taille. L'ordre de présentation des lettres était aléatoire entre participants. Chaque session d'évaluation durait environ 15 minutes.

Un grand nombre de mesures quantitatives et qualitatives sont utilisées pour évaluer l'écriture. Toutefois, comme l'interface de guidage haptique a été construite en vue d'améliorer la fluidité du mouvement d'écriture, nous avons basé nos mesures uniquement sur des paramètres cinématiques. De plus, certaines études ont montré que les différences entre les enfants avec et sans difficultés d'écriture ne reposent pas seulement sur des différences concernant la trace écrite mais également sur la dynamique du mouvement d'écriture (Smits-Engelsman, Niemeijer, & Van Galen, 2001; Van Galen, Portier, Smits-Engelsman, &

Shomaker, 1993; Wann & Kardiramanathan, 1991). Selon ces études, les processus d'écriture des faibles scripteurs par rapport aux scripteurs compétents, se caractérisent au niveau temporel par une vitesse de mouvement moins importante, une plus grande fréquence de pauses, un manque de continuité et de fluidité du mouvement. Par conséquent, nous avons choisi de calculer pour chaque lettre produite, la vitesse de production moyenne, le nombre de pics de vitesse et le nombre de levers de crayon pendant l'exécution. Le nombre de pics de vitesse correspond aux inflexions du profil de vitesse qui permettent de discriminer les « strokes » et nous fournit une information de dysfluente, c'est-à-dire, le nombre d'accélération et décélération au cours du mouvement. Le nombre de levers de crayon nous permet d'obtenir une information sur le nombre de traits nécessaires pour former la lettre et nous fournit indirectement une information sur la taille de l'unité du programme moteur.

6.2.2.2 Les sessions d'entraînement

Deux groupes équivalents de 21 enfants ont été constitués en utilisant leurs performances en écriture au prétest. Ainsi, 21 enfants ont été affectés à l'entraînement visuo-haptique (VH) et 21 à l'entraînement contrôle (C). Les entraînements consistaient en six sessions (une par semaine) où une lettre spécifique (*a, b, f, i, l, s*) était abordée. Par conséquent, l'intervention durait six semaines. À chaque séance, les enfants étaient invités à effectuer quatre exercices, qui étaient proposés dans un ordre aléatoire entre les participants. Ces exercices duraient environ 20 minutes. Deux exercices étaient communs aux deux entraînements. Dans le premier exercice, les enfants étaient invités à colorier la lettre cible. Dans le deuxième exercice, les enfants devaient effectuer un puzzle de quatre pièces qui représentait la lettre cible. La taille et la forme de la lettre étaient les mêmes dans les deux exercices et la même que celle produite par l'interface. Les deux exercices spécifiques à chaque intervention sont décrits dans la partie suivante.



Figure 28. Vue schématique globale de la station de travail. Les enfants sont assis devant une table, les lettres générées par l'interface visuo-haptique sont affichées sur un écran d'ordinateur horizontal. Les enfants doivent tenir un stylo attaché au bras à retour de force contrôlé par le logiciel du dispositif haptique.

Les exercices spécifiques de l'entraînement Visuo-haptique

Dans l'intervention VH, les enfants étaient confortablement assis devant une table et étaient invités à tenir un stylo (14 cm de long) de manière «naturelle». Ce stylo était fixé à un bras à retour de force (Phantom[®] 1.5), contrôlé par un logiciel (Figure 28). Les lettres générées par l'interface visuo-haptique étaient affichées sur un écran d'ordinateur horizontal (30 cm X 22 cm). Pour les détails des calculs utilisés pour construire la dynamique et les aspects statistiques de la police, se référer à l'article de Hennion, Gentaz, Gouagout et Bara (2005). La distance entre la poitrine des enfants et l'écran horizontal affichant les lettres était maintenue constante entre les participants. Il est à noter que le stylo ne touchait jamais l'écran mais était maintenu à une distance d'environ 1.5 cm. Le bras robot génère une force de réaction qui permet de simuler une surface de contact virtuelle. Après une phase de familiarisation pendant laquelle les enfants devaient écrire leur prénom et produire un dessin qui apparaissait en temps réel sur l'écran de l'ordinateur, chaque enfant effectuait deux exercices gérés par l'interface haptique: le « jeu du circuit » et « le tracé dynamique » de lettres. L'ordre de ces deux exercices était aléatoire entre les participants.

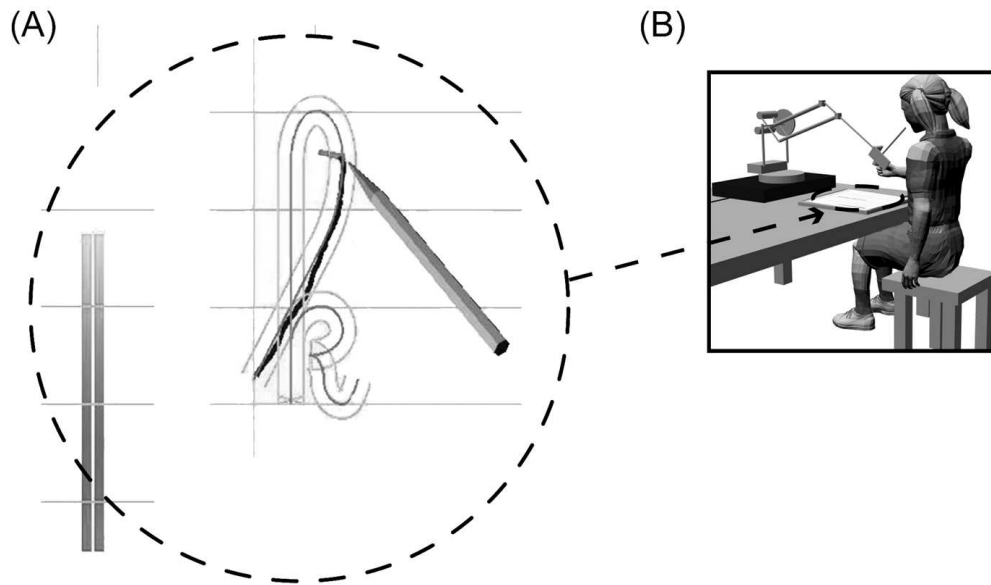


Figure 29. Le jeu du circuit. (A) Une lettre représentée à l'intérieur d'un rail apparaissait sur l'écran d'ordinateur. La distance entre les deux bords du rail était de 0.8 cm. (B) L'enfant saisissait le crayon – représenté à l'écran par un crayon virtuel – attaché au bras robot à retour de force. Les enfants devaient reproduire la lettre en suivant la ligne cursive tout en restant à l'intérieur du rail. Si l'enfant déviait de la trajectoire correcte ou ne produisait pas la lettre dans l'ordre correct, le dispositif haptique générait une force qui attirait le stylo dans la bonne direction.

Le jeu du circuit

Cet exercice était centré sur l'ordre de production correct des lettres. Dans cet exercice, une lettre représentée sous forme de rail apparaissait sur l'écran de l'ordinateur (Figure 29). Les enfants tenaient le stylo et venaient se positionner au point de départ de la lettre, sur la ligne cursive située au milieu du rail. Ils étaient alors invités à reproduire la lettre en suivant la ligne cursive tout en restant à l'intérieur du rail. La taille des lettres produites par le dispositif et projetées sur l'écran de l'ordinateur est indiquée dans le Tableau 9.

Tableau 9. Taille (en millimètres) des lettres produites par le dispositif haptique en x (axe horizontal) et y (axe vertical).

Lettre	Taille (mm)		Lettre	Taille (mm)	
	x	y		x	y
a	24	25	i	20	35
b	20	75	l	18	75
f	20	123	s	17	22

Le tracé produit par l'enfant s'affichait en temps réel sur l'écran. Si l'enfant déviait de la trajectoire correcte ou ne produisait pas la lettre dans un ordre correct, le dispositif haptique générait une force qui attirait le stylo dans la bonne direction. Dans ce cas, la pointe du stylo était attirée vers le point le plus proche de la lettre, perpendiculairement à la courbure (Figure

30). La force générée était progressivement réduite au cours de l'exercice. Ainsi, plus le mouvement était libre et plus l'enfant devait contrôler son mouvement pour rester sur la bonne trajectoire. Chaque enfant exécutait 10 essais pour chaque lettre. Pour les quatre premiers essais, la force générée par le dispositif était égale à 500g/cm. Pour les deux essais suivants, la force était de 250g/cm, et de 125g/cm pour les septième et huitième essais. Enfin, pour les deux derniers, aucune force n'était appliquée.

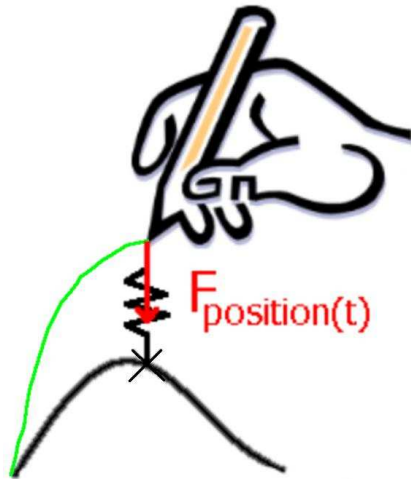


Figure 30. Guidage haptique en position : la force ressentie par l'utilisateur est proportionnelle au déplacement entre la position courante de l'utilisateur (courbe verte) et la position théorique de référence de la courbe modèle (en noir) [repris de Bluteau et al., 2008].

Le tracé dynamique de lettres

Cet exercice était consacré à l'aspect dynamique de l'écriture. Dans cet exercice, les enfants tenaient le stylo, une lettre apparaissait sur l'écran et le stylo se déplaçait "seul" le long de la trajectoire. La taille des lettres produites par le dispositif et projetées sur l'écran d'ordinateur est indiquée dans le Tableau 9.

Tableau 10. Durées de mouvements (en secondes) utilisées pour l'exercice de « tracé dynamique » en fonction des lettres et de l'essai.

Lettre	Durée de mouvement (s)			Lettre	Durée de mouvement (s)		
	Essai 1-4	Essai 5-7	Essai 8-10		Essai 1-4	Essai 5-7	Essai 8-10
a	5.7	4.2	3.2	i	5.2	3.9	2.9
b	6.4	4.8	3.6	l	4.2	3.1	2.3
f	11.6	8.7	6.5	s	3.0	2.2	1.6

La police dynamique était utilisée ici pour guider le stylo au bon endroit au bon moment de façon naturelle (Figure 31) : le mouvement généré par le dispositif suit les principes de base de production de l'écriture à savoir, le principe d'isochronie et la loi de

puissance deux-tiers (chapitre 2.1.2.1). Dix essais étaient effectués pour chaque lettre. Comme dans le jeu de circuit, les temps de mouvement pour produire la lettre étaient réduits au cours de la session (Tableau 10).

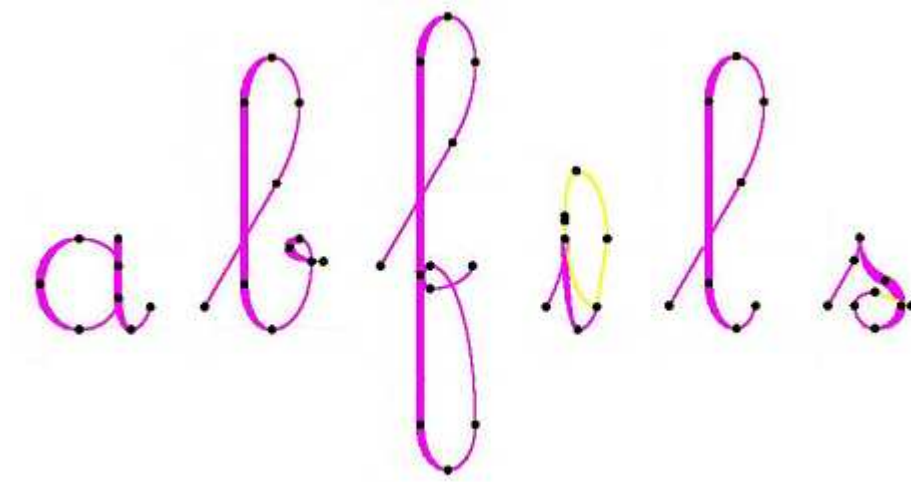


Figure 31. Les lettres sont construites à partir de points de contrôle, arcs elliptiques et lignes droites. Les points de contrôle représentent les points de départ et d'arrêt des traits, les points tangents verticaux et horizontaux et les points d'inflexion et de rebroussement. Les levers de crayon sont également décrits (tracé jaune). Entre chaque couple de points de contrôle successifs, sont calculés les arcs elliptiques minimums qui permettent le calcul des aspects dynamiques de la police en appliquant la loi de puissance deux-tiers [Adapté de Hennion et al., 2005].

Les deux exercices spécifiques de l'entraînement contrôle (C)

En ce qui concerne l'entraînement C, nous avons proposé un exercice dans lequel les enfants devaient écrire les lettres cibles et un exercice impliquant un ordinateur comme dans l'intervention VH. Dans le premier exercice, les enfants étaient assis en groupes de quatre-cinq autour d'une table et devaient copier dix fois la lettre cible dont l'ordre de production était indiqué par des flèches, sur une feuille de papier et juger laquelle avait « la meilleure forme ». Ainsi, le geste de production était entraîné. De plus, Jongmans, Linthorst-Bakker, Westenberg, et Smits-Engelsman (2003) ont montré que ce type d'exercices d'auto-évaluation permet une amélioration importante de la lisibilité de l'écriture d'enfants mauvais scripteurs.

Le deuxième exercice était réalisé individuellement comme dans l'intervention VH. Les enfants étaient confortablement assis devant un ordinateur portable et devaient taper sur un logiciel de traitement de texte une phrase dans laquelle la lettre cible apparaissait fréquemment.

6.3 Résultats

Pour chaque paramètre mesuré, une ANOVA 2 (période) \times 6 (lettres) \times 2 (entraînements) a été conduite. Comme nous avons émis l'hypothèse d'un bénéfice de l'intervention VH sur l'acquisition de l'écriture, nous nous attendions à une interaction significative entre la période et le type d'entraînements avec des performances plus élevées pour le groupe VH en post-test.

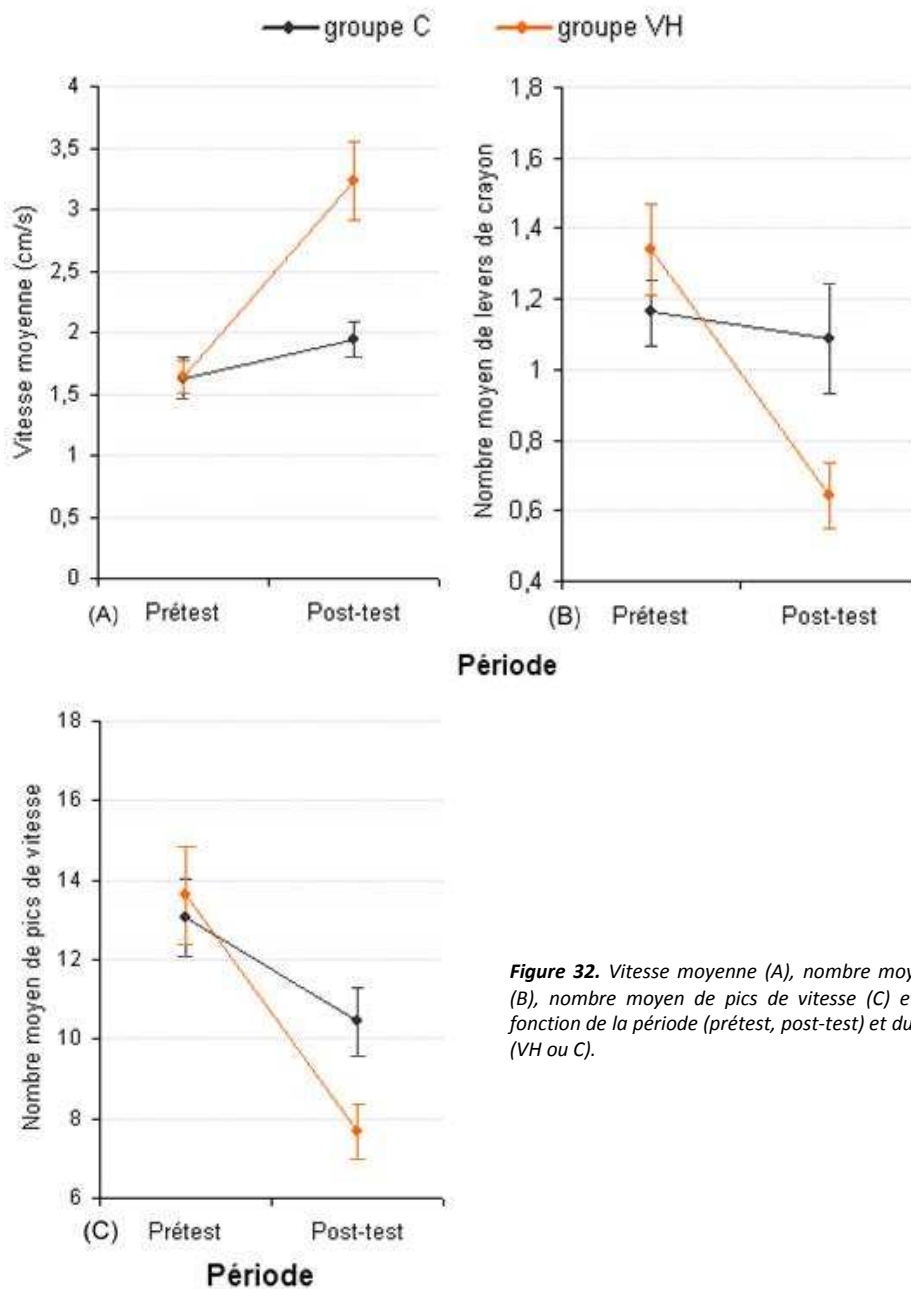


Figure 32. Vitesse moyenne (A), nombre moyen de levers de crayon (B), nombre moyen de pics de vitesse (C) et erreurs standards, en fonction de la période (prétest, post-test) et du groupe d'entraînement (VH ou C).

6.3.1 Vitesse moyenne

La Figure 32 (A) illustre la vitesse moyenne pour chaque groupe d'entraînement en fonction de la période. Une interaction significative entre la période et le groupe est observée [$F_{(1,40)}=13.96, p<.01$]. Lors de la séance de prétest, la vitesse moyenne était respectivement de 1.62 cm/s et 1.6 cm/s pour les groupes contrôle et visuo-haptique. Lors de la session de post-test la vitesse moyenne était de 1.94 cm/s pour le groupe contrôle et de 3.23 cm/s pour le groupe visuo-haptique. De plus, cet effet ne dépend pas de la lettre puisqu'aucune interaction significative entre le groupe d'entraînement, la période et la lettre n'est observée [$F_{(5,200)}=1.08, p>.05$].

6.3.2 Le nombre de pics de vitesse

En ce qui concerne le nombre de pics de vitesse lors de l'exécution de lettres, une interaction significative entre la période et le groupe d'entraînement est observée [$F_{(1,40)}=6.63, p<.05$] (Figure 32, C). Au moment du post-test, le nombre moyen de pics de vitesse était en effet moins important pour le groupe VH ($m=7.67$) par rapport au groupe C ($m=10.44$). Lors du prétest, le nombre moyen de pics de vitesse était respectivement de 13.64 et 13.04 pour les groupes VH et C. Enfin, l'interaction entre le groupe d'entraînement, la période et la lettre n'est pas significative [$F_{(5,200)}=0.37, p>.05$]. Par conséquent, l'interaction entre la période et le groupe ne dépend pas de la lettre produite.

6.3.3 Nombre de levers de crayon

Le nombre moyen de fois où les enfants levaient le stylo de la tablette au cours du mouvement est présenté dans la Figure 32 (B). Une interaction significative entre la période et le groupe d'entraînement est observée [$F_{(1,40)}=6.71, p<.05$]. Dans le groupe VH, les enfants levaient en moyenne 1.34 fois le crayon au prétest et 0.64 fois au post-test. Dans le groupe C, le nombre de ruptures dans le mouvement était respectivement de 1.16 et de 1.08 pour le pré- et post-test. Cet effet ne semble pas dépendre de la lettre car aucune interaction significative entre le groupe d'entraînement, la période et la lettre n'est observée [$F_{(5,200)}=0.91, p>.05$].

6.4 Discussion

L'objectif de l'étude était d'évaluer si l'utilisation d'une exploration visuo-haptique de lettres cursives pouvait améliorer les performances en écriture d'enfants de grande section de

maternelle (5 ans). Pour tester cette hypothèse, nous avons comparé l'efficacité de deux types d'entraînements à l'écriture, un entraînement classique (C) et un entraînement impliquant un dispositif haptique (VH) pour l'apprentissage de six lettres cursives (*a, b, f, i, l, s*). Les résultats indiquent que la fluidité de l'écriture est améliorée après l'intervention VH, pour chaque lettre. En effet, après les sessions d'entraînement, les performances du groupe VH étaient meilleures que celles du groupe contrôle: la vitesse moyenne augmentait, les mouvements présentaient moins de pics de vitesse et les enfants levaient moins souvent le stylo pendant l'exécution. Il est reconnu que les différences entre les enfants avec et sans difficulté d'écriture ne résident pas seulement dans les produits écrits finaux, mais aussi dans la dynamique de leurs mouvements d'écriture (Van Galen et al., 1993; Wann, 1987; Wann & Kardirkamanathn, 1991). Par conséquent, il peut être admis que l'entraînement visuo-haptique améliore la production des lettres cursives. De plus, il est à noter que les résultats sont les mêmes quelle que soit la difficulté des lettres. Il serait également intéressant de vérifier si cette amélioration serait observée non seulement pour les lettres cibles, mais également pour des lettres non entraînées lors de l'intervention visuo-haptique. Bien qu'acquérir une grammaire de l'action spécifique à chaque lettre soit nécessaire, l'ordre de production entre certaines lettres est proche et des transferts de compétences pourraient avoir lieu. Ainsi, apprendre à tracer la lettre *l* cursive pourrait bénéficier au traçage des lettres cursives *b, h* ou *k*. Dans ce sens, pour améliorer la réalisation du geste moteur, des exercices de pré-écriture, qui consistent à tracer des boucles et des arcades, constituants de base des lettres, produisent des effets bénéfiques (Smits-Engelsman, Niemeijer, & Van Galen, 2001). Ce type d'exercices pourrait favoriser l'apprentissage de certaines règles de production comme la progression gauche/droite ou le sens de rotation anti-horaire. Des études complémentaires sont nécessaires pour examiner la question du « transfert inter-lettres ».

Au début de l'apprentissage de l'écriture, comme nous l'avons vu lors du chapitre 2, le contrôle moteur est rétroactif (basé sur les retours sensoriels). Les mouvements sont lents et guidés par les informations visuelles et kinesthésiques (Zesiger, 1995). Avec la pratique, l'écriture devient plus automatisée et le contrôle du mouvement est surtout proactif (basé sur une représentation interne de l'acte moteur). Par conséquent, nous pouvons penser que l'utilisation du dispositif haptique aide le système moteur à intégrer les règles de base de la production motrice et conduit donc les enfants à utiliser une stratégie proactive pour contrôler les mouvements d'écriture. En effet, comme l'interface est en mesure de guider les doigts de l'enfant via le stylo à la fois dans des mouvements spatiaux et dynamiques corrects, ceci permettrait d'améliorer l'acte moteur nécessaire au traçage de la lettre. Ainsi, la vitesse

moyenne d'exécution des lettres augmentait et le nombre d'accélération et décélération au cours du mouvement était moins important. La diminution observée du nombre de levers de crayon reflète la diminution du nombre de traits nécessaires à la formation des lettres et pourrait témoigner d'une augmentation de la taille du programme moteur. Selon Zesiger (1995), l'acquisition de l'écriture se traduirait par l'augmentation de la taille des unités contenues dans le programme moteur. Les jeunes enfants effectueraient de petits traits successifs pour aboutir à la formation d'une lettre. Au cours de l'apprentissage, la taille des traits deviendrait de plus en plus importante pour atteindre le format d'une lettre.

En conclusion, un entraînement visuo-haptique familiarise l'enfant au geste d'écriture et permet un début d'automatisation qui se traduit par une fluidité plus importante des tracés. Au cours de l'apprentissage, cette automatisation du geste d'écriture est primordiale pour l'enfant qui dans la plupart des tâches scolaires est placé en situation de double tâche. Si l'enfant se concentre sur la formation des lettres et le contrôle de ses mouvements alors, l'attention nécessaire à l'application de règles de grammaire et d'orthographe est perturbée tout comme la qualité des idées lors d'une composition (Berninger et al., 1997; Bourdin & Fayol, 1994, 1996, 2002).

Cette étude montre une amélioration importante de la fluidité de l'écriture suite à un entraînement qui consiste à explorer des lettres via un dispositif haptique, par rapport à entraînement manuel classique: la vitesse d'écriture est plus importante et le nombre de pics de vitesse et de levers de crayon sont moins importants. Ces premiers résultats montrent que l'utilisation d'un guidage haptique en position est bénéfique dans l'apprentissage du tracé des lettres chez des enfants de grande section de maternelle débutant dans le tracé de lettres.

Chapitre 7.

Exploration haptique de formes et apprentissage des associations forme-son

Etude 4. Evaluation de l'effet de l'exploration haptique de formes abstraites sur l'apprentissage d'associations arbitraires entre des formes et sons nouveaux chez l'adulte.

Cette étude a fait l'objet d'une publication sous la référence suivante (voir Annexe H) :

Fredembach, B., Hillairet de Boisferon, A. & Gentaz, E. (2009). Learning of arbitrary association between visual and auditory novel stimuli in adults: the "bond effect" of haptic exploration. *Plos One*, 4(3) :e4844

7.1 Introduction

Dans l'étude 1, après avoir noté une absence de bénéfice de l'exploration haptique de lettre sur le niveau de leur connaissance (malgré une amélioration du niveau de décodage des enfants), nous avons remis en cause la tâche d'identification de lettres proposée. Afin d'évaluer conjointement la précision et la rapidité de la connaissance des lettres, nous avons suggéré de recueillir, en plus du score d'identifications correctes, un temps de réaction. Nous avons également émis l'hypothèse que les effets de l'ajout de la modalité haptique dans l'exploration de lettres pouvaient se manifester de manière asymétrique dans les tâches de connaissance de lettres. Cette hypothèse s'appuyait sur l'idée que, suite à une exploration haptique de lettres, le passage de la forme au son (comme, par exemple, au cours de la tâche de dénomination) serait davantage facilité que le passage du son à la forme (comme, par exemple, dans notre tâche d'identification). Dans l'étude 2, nous avons mis en évidence que la connaissance du nom des lettres, plus particulièrement la précision et la rapidité de la dénomination des lettres, est la compétence la plus en lien avec le niveau de connaissance des correspondances graphème-phonème et le niveau de décodage des enfants en grande section de maternelle. De plus, nous avons noté qu'au cours de l'année les tâches de dénomination et d'identification de lettres se distinguent, tout comme les liens qu'elles entretiennent avec le décodage.

Toutefois, avant de pouvoir observer un effet de l'exploration haptique des lettres sur la dénomination, nous supposons que le premier processus influencé est le traitement de

l'information spatiale des lettres ; la première étape de la reconnaissance des caractères écrits étant l'analyse spatiale de la forme (chapitre 2.1.1). En effet, forme et mouvements d'exploration sont intrinsèquement liés, d'autant plus lorsque la tâche de l'enfant est de suivre les contours de la lettre dans le sens de l'écriture. Les mouvements issus de l'exploration haptique des lettres pourraient contribuer à la mémorisation de la forme. Dans ce sens, Hulme (1981) montre dans ses études que les enfants et les adultes sont capables de reconnaître visuellement un plus grand nombre de formes abstraites lorsqu'ils sont autorisés à les tracer avec le doigt. Longcamp et ses collaborateurs notent également qu'écrire les lettres permet une meilleure reconnaissance *a posteriori* de leur forme visuelle chez les enfants (Longcamp, et al., 2005) et de leur orientation chez les adultes (Longcamp, Boucard, Gilhodes, & Velay, 2006).

Dans cette nouvelle étude, il s'agit donc de tester plus directement l'effet de l'ajout de la modalité haptique sur la forme des lettres et sur l'apprentissage des associations entre une forme et le son qui lui correspond. Toutefois, afin de s'abstraire des influences particulières entre les compétences métaphonémiques, la connaissance du son et du nom des lettres au début de l'apprentissage de la lecture (Chapitre 2.3 et Etude 2), nous nous sommes intéressés à une population d'adultes. Il s'agira donc de tester, chez des personnes expertes en lecture, les effets d'une exploration haptique de formes abstraites sur l'apprentissage de ces formes et de nouvelles associations arbitraires forme-son.

Des adultes ont donc du apprendre des formes abstraites nouvelles, arbitrairement associées à un son également nouveau, en utilisant deux méthodes d'apprentissage qui différaient quant à la modalité perceptive impliquée dans l'exploration des formes. Les adultes utilisaient la modalité visuelle, dans l'apprentissage dit « classique », et les modalités visuelle et haptique afin d'explorer les formes, pendant que le son associé leur était présenté simultanément dans un casque, dans l'apprentissage dit « multisensoriel ». Suite aux deux entraînements, nous avons évalué, immédiatement, puis après une semaine de délai, le niveau de connaissance des formes et des sons (tâches intramodales) ainsi que le niveau de connaissance des associations forme-son dans les deux sens de l'association (tâches intermodales).

De manière générale, si l'ajout de l'exploration haptique est efficace et aide les adultes à apprendre plus efficacement les associations arbitraires entre des formes et sons nouveaux, les performances dans les tâches de reconnaissance intermodales devraient révéler cet effet positif. Les capacités de reconnaissance des associations devraient être plus importantes après

l'apprentissage multisensoriel par rapport à l'apprentissage classique visuel. Si cet effet positif est indirectement dû à la meilleure mémorisation des formes abstraites, les participants devraient reconnaître davantage de formes après la méthode multisensorielle que la méthode classique.

7.2 Méthode

7.2.1 Participants

Trente étudiants droitiers (6 hommes, 24 femmes) de langue maternelle française, âgés en moyenne de 20 ans et 6 mois (18 à 28 ans) ont participé à l'étude. Les étudiants ont été répartis de manière aléatoire dans deux groupes d'apprentissage nommés « classique » et « multisensoriel ». Les tests *t* de Student conduits sur les scores au test *PM-38* (*Progressives Matrices de Raven*, mesure des aptitudes intellectuelles générales) et l'âge des participants n'ont révélé aucune différence significative entre les deux groupes [$t_{(28)}=-1.12$, $p>.05$] (Tableau 11).

Tableau 11. Caractéristiques des étudiants avant les entraînements dans chacun des groupes (moyennes et écart-types entre parenthèses).		
Entraînement	Age (en années)	PM-38
Classique	20.6 (2.7)	10.8 (5.7)
Multisensoriel	20.6 (2.2)	10.4 (3.9)

7.2.2 Matériel et procédure

7.2.2.1 Les stimuli

Formes abstraites visuelles et visuo-haptiques

Les formes utilisées sont dérivées de caractères *katakana* de l'alphabet japonais. Un ensemble de 35 formes abstraites a été construit à l'aide d'un logiciel graphique (Adobe Creator®). Quinze formes ont été sélectionnées aléatoirement pour devenir les formes cibles des apprentissages « classique » et « multisensoriel » (Figure 33). Les formes apprises étaient

donc les mêmes au sein des deux entraînements. Toutefois, les formes cibles visuelles étaient imprimées sur des cartes et plastifiées (14.5 x 20.5cm) et les formes cibles visuo-haptiques étaient découpées dans de la mousse (5mm d'épaisseur) et collées sur des plaques de carton plume (14.5 x 20.5cm).



Figure 33. Les 15 stimuli cibles visuels et visuo-haptiques utilisés pour les deux méthodes d'apprentissage (dimension moyenne : 7.5 x 11.5cm).

Les 20 formes restantes servaient de formes distractrices, lors des phases test qui suivaient la phase d'apprentissage (Figure 34).



Figure 34. Dix exemples de distracteurs utilisés pour les tâches de reconnaissance immédiate et différée suite aux deux méthodes d'apprentissage (dimension moyenne : 7.5 x 11.5cm).

Stimuli auditifs

Trente cinq sons ont été créés à l'aide d'un logiciel permettant d'obtenir une voix digitalisée (Microsoft Sam[®]). Les stimuli sonores étaient constitués de séquences de deux ou trois sons co-articulés (e.g., rx, ol, tef) de manière à ce que les lettres correspondant aux sons ne soient pas distinguables individuellement. Les sons produits par les différentes combinaisons étaient sans signification. La durée de chacun des sons était en moyenne de 500ms. Les sons étaient par la suite présentés aux participants à l'aide d'un casque (Sony[®]).

MDR-V150). Comme précédemment, parmi les 35 sons créés, 15 sons, sélectionnés aléatoirement, constituaient la banque de sons à apprendre et les 20 sons restant la banque de distracteurs pour les phases test.

Association entre les stimuli visuels/visuo-haptiques et auditifs

Les associations entre les 15 formes visuelles (ou visuo-haptique) et les sons étaient arbitraires et déterminées de manière aléatoire. Une fois les associations créées, elles demeuraient les mêmes pour tous les participants. L'ordre de présentation des associations était randomisé entre participants pour les deux groupes d'apprentissage.

7.2.2.2 Les conditions expérimentales

Deux groupes de 15 participants ont été constitués. Une méthode d'apprentissage spécifique a été proposée à chacun des deux groupes : un apprentissage « classique » (visuel-auditif) ou un apprentissage « multisensoriel » (visuel-auditif-haptique). Pour chaque méthode, l'apprentissage durait environ 10 minutes et l'ensemble des associations était présenté en une seule session. A l'issue de la session d'apprentissage, chaque participant effectuait immédiatement quatre tâches de reconnaissance, qu'il devait à nouveau réaliser après un délai d'une semaine.



Figure 35. Exemple d'un participant en phase d'apprentissage multisensoriel. Le participant explorait la forme en relief librement à l'aide de ses doigts ou de sa main, sous contrôle visuel, tout en prêtant attention au son qui était présenté simultanément dans le casque.

Les deux méthodes d'apprentissage

Dans le groupe soumis à l'apprentissage multisensoriel, chaque participant devait explicitement apprendre les 15 associations (les formes et les sons correspondants) en utilisant les modalités visuelle, auditive et haptique. Pour chaque association, les participants devaient explorer la forme en relief librement à l'aide de leur(s) doigt(s) ou de leur main, sous contrôle visuel, tout en prêtant attention au son qui leur était présenté simultanément (Figure 35). Parce que la durée de l'exploration visuo-haptique était fixée à 10 secondes, le son était répété trois fois de suite (intervalle inter-stimuli de 3 secondes), dans le but d'égaliser les temps de présentation. Cette procédure était répétée pour chacune des 15 associations à apprendre. C'est l'expérimentateur qui posait la carte de la forme en relief correctement orientée sur la table, face au participant, puis la retirait au bout de 10 secondes avant d'en introduire une nouvelle.

Dans le groupe soumis à l'apprentissage classique (visuel et auditif) la procédure expérimentale était la même. Comme précédemment, l'expérimentateur plaçait la carte face au participant mais ce dernier ne pouvait procéder qu'à une exploration visuelle pendant qu'il entendait le son se répéter.

Suite à la phase d'apprentissages, quatre tâches de reconnaissance étaient proposées. Chaque participant devait effectuer deux tâches « intramodales », dans un ordre aléatoire, suivi de deux tâches « intermodales » également dans un ordre aléatoire. Les tâches « intramodales » correspondent aux tâches de reconnaissance des formes et des sons isolés et les tâches « intermodales », aux tâches de reconnaissance des associations audio-visuelles et visuo-auditives. L'ensemble des tâches étaient administrées immédiatement après la phase d'apprentissage (reconnaissance immédiate), puis une semaine plus tard (reconnaissance différée). Aucun feedback n'était donné sur les réponses pendant la phase test.

Reconnaissance intramodale

Concernant la tâche de reconnaissance intramodale visuelle, il est demandé aux participants de retrouver chacune des formes précédemment apprises parmi cinq possibilités (1 cible et 4 distracteurs). Pour chacune des 15 formes apprises, le participant recevait une feuille A4 sur laquelle figuraient les cinq formes imprimées. Le participant devait alors entourer au crayon la forme qu'il pensait reconnaître. L'ordre de présentation des formes et la position de la cible sur la feuille étaient aléatoires. Un score global de reconnaissance des formes (sur 15 points) était récolté pour chaque participant.

Pour la tâche de reconnaissance auditive intramodale, le participant devait reconnaître le son qu'il pensait avoir précédemment appris parmi cinq sons (1 cible et 4 distracteurs). L'ordre de présentation des sons et la position temporelle de la cible étaient aléatoires. Un score global de reconnaissance des sons (sur 15 points) était récolté pour chaque participant.

Reconnaissance intermodale

Concernant la tâche de reconnaissance intermodale visuo-auditive, une forme cible était présentée au participant, qui devait trouver le son correspondant parmi cinq sons (1 cible et 4 distracteurs). Les quatre sons distracteurs faisaient tous partie des sons entendus lors de la phase d'apprentissage mais étaient associés à d'autres formes. Un score global de reconnaissance des associations visuo-auditives (sur 15 points) était récolté pour chaque participant.

Concernant la tâche de reconnaissance intermodale audio-visuelle, un son cible était présenté au participant, qui devait trouver la forme correspondante parmi cinq formes (1 cible et 4 distracteurs). Les quatre formes distractrices faisaient partie des formes présentées lors de la phase d'apprentissage mais étaient associés à d'autres sons. Un score global de reconnaissance des associations audio-visuelles (sur 15 points) était récolté pour chaque participant.

Il convient de noter que les deux tâches de reconnaissance intramodales et les deux tâches de reconnaissance intermodales sont de nature différente. En effet, pour les tâches intramodales, il était demandé au participant de reconnaître une cible (stimulus appris) parmi de nouveaux distracteurs (stimuli non appris) alors que pour les tâches intermodales, ils devaient reconnaître une cible (stimulus appris) parmi d'autres stimuli appris (i.e., familiers) mais non pertinents.

7.3 Résultats

7.3.1 Tâches de reconnaissance intramodales

Dans un premier temps, nous avons analysé, de manière indépendante, l'efficacité de l'apprentissage pour les formes et les sons au sein des deux groupes d'apprentissage. Des tests *t* de Student ont été réalisés pour comparer les performances obtenues immédiatement après l'apprentissage dans chaque groupe au « niveau de chance » (soit 1/5 par item et donc 3/15 au total). Pour les formes, les résultats montrent que les performances étaient significativement différentes du niveau de chance pour les méthodes d'apprentissage multisensorielle ($m=7.3$,

$ET=1.9$; $t_{(14)}=8.5$, $p<.05$) et classique ($m=8$, $ET = 2.9$; $t_{(14)}=6.6$, $p<.05$). Cela signifie que les participants étaient capables d'apprendre les nouvelles formes dans les deux groupes. En ce qui concerne les sons, les résultats montrent que les performances en reconnaissance immédiate étaient nettement au-dessus du niveau de chance pour les méthodes d'apprentissage multisensorielle ($m= 8.87$, $ET=1.13$; $t_{(14)}=20.2$, $p<.05$) et classique ($m=8.13$, $ET=2.7$, $t_{(14)}=7.38$, $p<.05$). Les participants étaient également capables d'apprendre les nouveaux sons dans les deux groupes (Figure 36).

7.3.1.1 Tâche visuelle

Une analyse de variance (ANOVA) a été réalisée sur le nombre moyen de formes abstraites correctement reconnues, avec le délai (reconnaissance immédiate et différée) comme facteur intra-sujets et les méthodes d'apprentissage (multisensorielle ou classique) comme facteur inter-sujets (Figure 36). Cette analyse ne révèle pas d'effet principal de la méthode d'apprentissage [$F_{(1,28)}=0.76$, $p>.05$]. Le délai permet au niveau de performance d'augmenter significativement [$F_{(1,28)}=4.46$, $p<.05$, $\eta^2=0.14$] : les performances étaient meilleures en reconnaissance différée ($m=8.7$, $ET=2.4$) qu'en reconnaissance immédiate ($m=7.6$, $ET=2$). L'interaction entre la méthode d'apprentissage et le délai n'est pas significative [$F_{(1,28)}=0.1$, $p>.05$].

7.3.1.2 Tâche auditive

Une analyse de variance (ANOVA) a été réalisée sur le nombre moyen de sons correctement reconnus, avec le délai (reconnaissance immédiate et différée) comme facteur intra-sujets et les méthodes d'apprentissage (multisensorielle ou classique) comme facteur inter-sujets (Figure 36). Cette analyse ne révèle pas d'effet principal de la méthode d'apprentissage [$F_{(1,28)}=0.03$, $p>.05$], du délai [$F_{(1,28)}=1$, $p>.05$], ni d'interaction entre la méthode d'apprentissage et le délai [$F_{(1,28)}=1.64$, $p>.05$].

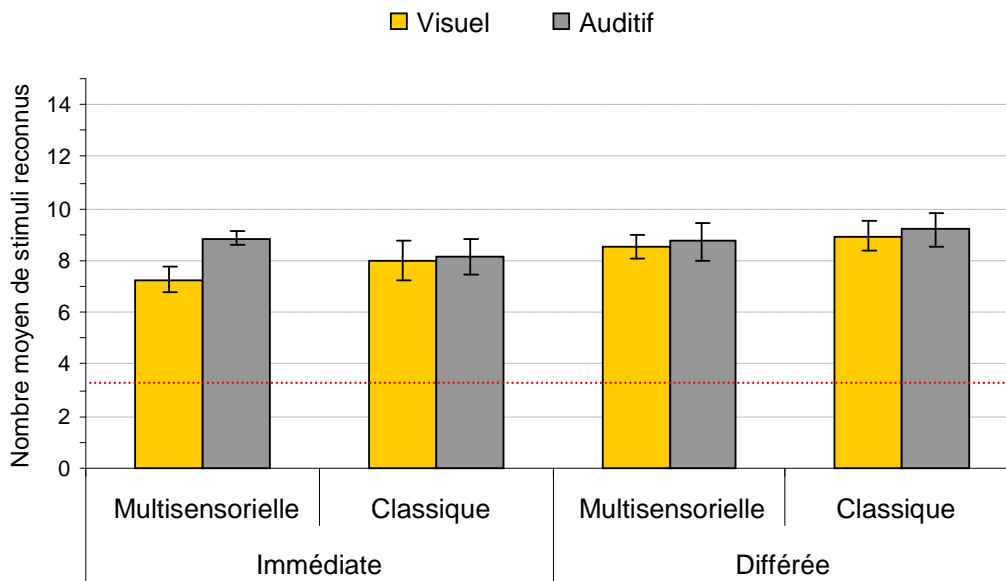


Figure 36. Nombre moyen (et erreur standard) de formes et sons correctement reconnus (maximum 15) en fonction de la méthode d'apprentissage et du délai. La ligne en pointillés correspond au niveau de chance.

7.3.2 Tâches de reconnaissance intermodales

Tout d'abord, nous avons testé l'efficacité de l'apprentissage des associations arbitraires entre ces nouvelles formes et sons pour les deux groupes. Des tests *t* de Student ont été utilisés afin de comparer, immédiatement après la phase d'apprentissage, les performances de chaque groupe au « niveau de chance ». Concernant la tâche de reconnaissance visuo-auditive, les résultats montrent que les performances immédiates sont significativement au-dessus du niveau de chance pour les méthodes multisensorielle ($m=9.20$, $ET=1.26$; $t_{(14)}=18.98$, $p<.05$) et classique ($m=6.67$, $ET=2.9$; $t_{(14)}=6.06$, $p<.05$). De la même manière, les résultats à la tâche de reconnaissance audio-visuelle montrent que les performances immédiates étaient significativement au-dessus du niveau de chance pour les méthodes d'apprentissage multisensorielle ($m=6.4$, $ET = 1.80$; $t_{(14)}=7.30$, $p<.05$) et classique ($m=5.7$, $ET=2.5$; $t_{(14)}=4.14$, $p<.05$) (Figure 37). Ainsi, l'apprentissage des associations arbitraires était possible au sein des deux groupes quel que soit le sens de l'association demandé au moment de la restitution (de la vision à l'audition ou de l'audition à la vision).

Dans un deuxième temps, une analyse de variance (ANOVA) a été réalisée sur le nombre moyen d'associations entre formes et sons correctement reconnues, avec le sens de l'association (visuo-auditive et audio-visuelle) et le délai (reconnaissance immédiate et

différée) comme facteurs intra-sujets, et les méthodes d'apprentissage (multisensorielle ou classique) comme facteur inter-sujets (Figure 37). Cette analyse révèle un effet principal de la méthode d'apprentissage [$F_{(1,28)}=8.66$, $p<.01$, $\eta^2=0.24$]. En effet, les performances étaient significativement plus élevées après l'apprentissage multisensoriel ($m=7.12$, $ET=2.17$) qu'après l'apprentissage classique ($m=5.57$, $ET=2.27$). L'introduction d'un délai entraînait une diminution significative de la performance [$F_{(1,28)}=14.58$, $p<.001$, $\eta^2=0.34$], le nombre moyen de reconnaissances correctes était plus important immédiatement après l'apprentissage ($m=6.88$, $ET=2.34$) qu'une semaine après ($m=5.8$, $ET=2.23$). Il existe également un effet principal du sens de l'association [$F_{(1,28)}=26.38$, $p<.001$, $\eta^2=0.49$]: les participants obtenaient de meilleurs résultats dans la tâche de reconnaissance visuo-auditive ($m=7.22$, $ET=2.18$) que dans la tâche de reconnaissance audio-visuelle ($m=5.47$, $ET=2.19$).

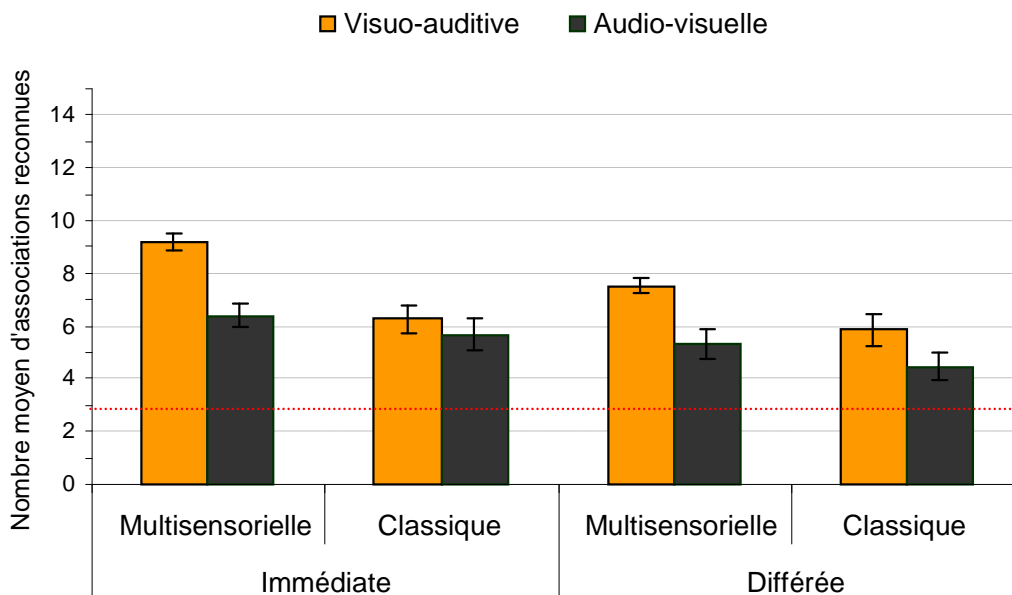


Figure 37. Nombre moyen (et erreur standard) d'associations visuo-auditive et audio-visuelle correctement reconnues (maximum 15) en fonction de la méthode d'apprentissage et du délai. La ligne en pointillés correspond au niveau de chance.

L'interaction entre la méthode d'apprentissage et le sens de l'association est également significative [$F_{(1,28)}=4.85$, $p<.05$]. Des comparaisons post-hoc de Newman-Keuls révèlent, qu'après la méthode d'apprentissage multisensoriel, les participants reconnaissaient davantage d'associations visuo-auditive ($m=8.37$, $ET=1.47$) qu'audio-visuelle ($m=5.87$, $ET=2.03$). En revanche, après un apprentissage classique, les performances observées pour la tâche de reconnaissance visuo-auditive ($m=6.07$, $ET=2.16$) et audio-visuelle ($m=5.07$,

$ET=2.26$) ne différaient pas de manière significative. De plus, les performances dans la tâche visuo-auditive étaient significativement meilleures après l'apprentissage multisensoriel qu'après l'apprentissage classique, alors qu'elles étaient équivalentes dans la tâche audio-visuelle (Figure 38). Les interactions entre la méthode d'apprentissage et le délai [$F_{(1,28)}=0.1$, $p=.33$] et entre le délai et le sens de l'association [$F_{(1,28)}=0.05$, $p>.05$] ne sont pas significatives. Enfin, la double interaction entre la méthode d'apprentissage, le délai et le sens de l'association [$F_{(1,28)}=2.42$, $p>.05$] n'est pas significative.

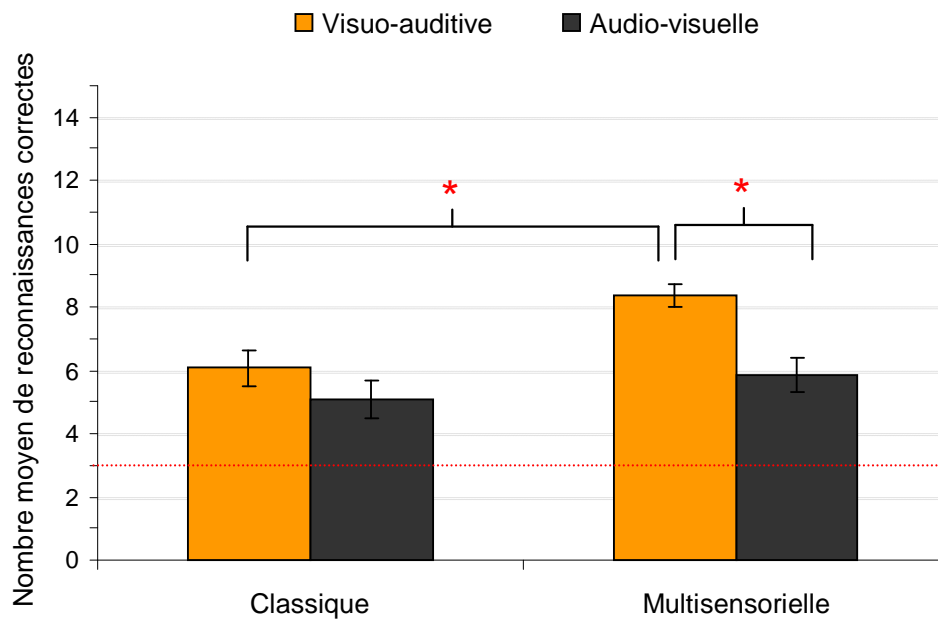


Figure 38. Nombre moyen (et erreur standard) d'associations visuo-auditive et audio-visuelle correctement reconnues (maximum 15) en fonction de la méthode d'apprentissage. La ligne en pointillés correspond au niveau de chance.

7.4 Discussion

Dans cette étude nous souhaitions vérifier si l'ajout de la modalité haptique dans l'exploration de formes abstraites pouvait mener des adultes à un apprentissage plus efficace de nouvelles associations arbitraires entre formes et sons. Nous avons émis l'hypothèse que cette amélioration pourrait être due à une meilleure mémorisation des formes. Pour tester ces hypothèses, des adultes ont été invités à apprendre 15 nouvelles associations arbitraires entre des formes et des sons nouveaux à travers deux méthodes d'apprentissage qui différaient quant aux modalités sensorielles impliquées dans le traitement des formes. Les participants

utilisaient la modalité visuelle dans la méthode d'apprentissage « classique » et les modalités visuelle et haptique dans la méthode « multisensorielle ».

Le premier résultat est que les performances dans la tâche de reconnaissance visuo-auditive étaient meilleures après la méthode multisensorielle qu'après la méthode classique. L'ajout de l'exploration haptique de nouvelles formes semble aider les adultes à associer davantage de formes et de sons qu'une exploration visuelle seule. Toutefois, les performances à la tâche de reconnaissance audio-visuelle sont similaires après les deux méthodes d'apprentissage. De plus, une asymétrie apparaît dans les tâches de reconnaissance intermodale pour le groupe multisensoriel. En effet, les participants reconnaissaient plus d'associations dans la tâche de reconnaissance visuo-auditive que dans la tâche audio-visuelle. Habituellement, les êtres humains obtiennent la majorité de leurs informations sur les objets à partir de la modalité visuelle, pour laquelle la forme est l'attribut le plus saillant. En proposant d'ajouter la modalité haptique dans la phase d'entraînement, il est possible que les signaux redondants, concernant les informations spatiales de forme, fournis par les modalités visuelle et haptique, aient permis d'augmenter la fiabilité du percept final de forme (« intégration sensorielle »). Premièrement, ceci pourrait expliquer pourquoi le groupe multisensoriel a obtenu de meilleures performances que le groupe classique. Par ailleurs, nous avons proposé d'associer arbitrairement aux formes, des sons qui étaient recueillis via la modalité auditive spécialisée dans le traitement temporel. Dans ce cas, les modalités visuelles et auditives impliquées dans l'apprentissage délivraient différentes informations pertinentes sur les formes et les sons (spatiale et temporelle). Une « combinaison sensorielle », qui consiste à maximiser l'information dérivée des différentes modalités, peut donc avoir eu lieu. Ainsi, la mémoire multimodale pourrait être optimisée et les participants parfaitement capables de reconnaître des formes à partir des sons et vice versa. L'asymétrie observée pour l'apprentissage multisensoriel pourrait provenir du plus grand poids attribué à l'information de forme dans la construction du percept multisensoriel final, puisque deux modalités sensorielles différentes travaillent conjointement à son appréhension, par rapport à l'information auditive.

La deuxième série de résultats importants montre qu'un nombre moyen équivalent de formes abstraites est reconnu par les participants après les deux méthodes d'apprentissage. L'effet de l'exploration haptique observé dans la tâche intermodale ne peut donc pas être simplement expliqué par une meilleure mémorisation des formes. Il semblerait qu'aucun changement au sein des représentations visuelles unisensorielles des formes ne se soit opéré

suite à l'apprentissage conjoint dans les diverses modalités sensorielles. Nous pouvons aussi émettre l'hypothèse que le percept de forme est bien amélioré par les informations complémentaires recueillies par l'exploration haptique mais que cette amélioration pourrait se manifester par une vitesse de reconnaissance plus importante. Alors, la tâche de reconnaissance intramodale utilisée dans la présente expérience constituerait de nouveau une mesure trop globale de la connaissance de forme qui ne prend pas en compte la vitesse de la reconnaissance. Par ailleurs, Pascual-Leone et Hamilton (2001) proposent que les entrées sensorielles pertinentes soient exploitées afin d'exécuter avec succès une tâche particulière. Il peut être supposé, qu'en raison de la nature des tâches proposées (reconnaître une forme apprise parmi des formes non apprises), la modalité visuelle fournit suffisamment d'informations spatiales fiables pour effectuer la tâche aussi précisément dans les deux groupes d'apprentissage.

Ce résultat nous amène aussi à nous interroger de nouveau sur les résultats de la reconnaissance intermodale suite à l'apprentissage multisensoriel. En s'appuyant sur le modèle d'apprentissage multisensoriel de Shams et Seitz (2008), nous pouvons penser que la représentation unimodale visuelle de la forme n'a pas été modifiée puisque nous n'observons pas de bénéfice de l'apprentissage multisensoriel sur sa connaissance. Toutefois, nous devons préciser que le temps d'apprentissage était très court et qu'une seule session était proposée. Cependant, il se pourrait que des représentations multisensorielles se soient développées suite aux deux apprentissages. La présentation visuelle ultérieure d'une forme apprise activerait alors un plus large réseau d'aires cérébrales unisensorielles et multisensorielles suite à un apprentissage multisensoriel (visuel, auditif et tactile) par rapport à un entraînement classique (visuel et auditif).

Cette étude montre que les adultes apprennent plus efficacement des associations arbitraires entre des formes et des sons nouveaux lorsque les formes sont explorées à la fois par la vision et le toucher. Toutefois, les résultats révèlent une asymétrie de performances dans les tâches de reconnaissance des associations forme-son. L'exploration haptique des formes bénéficie davantage aux associations « visuo-auditive » qu'« audio-visuelle ». De plus, aucun effet bénéfique n'est observé sur la mémorisation des formes. Bien que les mécanismes de l'action de l'exploration haptique soient encore en débat, elle semble jouer un rôle dans le « liage » entre des stimuli visuels et auditifs chez les adultes, comme révélé chez les jeunes enfants.

Chapitre 8.

Exploration haptique de formes abstraites et reconnaissance visuelle

Etude 5. Comparaison d'un apprentissage multisensoriel (visuo-haptique) et d'apprentissages unimodaux, visuel et haptique, de formes abstraites sur leur reconnaissance visuelle ultérieure.

8.1 Introduction

Les études 1 et 4 nous ont permis de confirmer l'intérêt de l'ajout de la modalité haptique, pour associer des formes et des sons, dans l'exploration de lettres ou de formes abstraites chez des jeunes enfants et des adultes. L'objectif des entraînements proposés était de faciliter l'apprentissage des liens arbitraires qui existent entre les graphèmes/formes et les phonèmes/sons pour que les participants puissent avoir recours, par la suite, à une procédure de décodage grapho-phonologique pour lire. Dans ce cadre, les modalités visuelle et auditive, classiquement impliquées dans l'apprentissage, fournissent des informations distinctes et spécifiques à une modalité sensorielle (spatiales et temporelles sur la forme et le son). Ces dernières sont indispensables à l'apprentissage. En proposant d'ajouter une exploration haptique des formes, nous avons supposé que les modalités visuelle et haptique fourniraient aux personnes des informations spatiales plus spécifiées qui permettraient une meilleure mémorisation des formes. Bien que la modalité haptique semble jouer un rôle de « liage » entre les formes et les sons dans nos deux populations, aucun bénéfice de l'exploration haptique sur la connaissance des formes elles-mêmes n'était observé. Plus précisément, l'étude 1 a mis en évidence, chez des enfants de GSM, un effet positif de l'exploration haptique de lettres sur l'utilisation des règles de conversion graphème-phonème (décodage de pseudo-mots) alors que par ailleurs, aucun bénéfice n'était observé sur la connaissance du nom des lettres. Dans l'étude 4, nous avons montré que des adultes apprenaient plus efficacement des associations arbitraires entre formes abstraites et sons nouveaux lorsqu'ils étaient autorisés à explorer haptiquement les formes.

Cependant, lorsque les participants adultes ou enfants exploraient haptiquement les formes, ils produisaient une séquence de mouvements qui définissait la forme. Une fois l'apprentissage terminé, la séquence de mouvements reproduite un certain nombre de fois,

nous pouvons penser qu'une représentation bi-univoque se crée entre la forme et le mouvement correspondant. Dans ce sens, plusieurs études ont mis en évidence que la reconnaissance visuelle des lettres est facilitée lorsqu'elles ont été préalablement associées à une activité motrice autour de leur forme chez les enfants ainsi que chez les adultes (Hulme, 1981 ; Longcamp et al., 2005 ; Naka, 1998 ; Naka & Noia, 1995). Par ailleurs, il a été montré que la mémoire motrice avec une pratique suffisante devient progressivement moins fragile et se consolide en quelques heures (Karni et al., 1998). Aussi, elle pourrait durer plusieurs mois même en l'absence de pratique supplémentaire (Shadmehr & Brashers-Krug, 1997), voire même se renforcer pendant les périodes de sommeil (pour une revue voir Walker, 2004).

Afin de tester plus spécifiquement l'effet de l'ajout d'une exploration haptique de la forme, et de sa composante kinesthésique, nous avons conduit une nouvelle étude. Nous avons proposé d'ajouter la modalité haptique dans l'exploration de formes abstraites bidimensionnelles afin de vérifier si un apprentissage multisensoriel (visuo-haptique) était plus efficace qu'un entraînement unisensoriel (visuel ou haptique) pour reconnaître visuellement les formes par la suite. Des adultes devaient donc apprendre 15 formes abstraites dans trois conditions (5 formes par condition) qui différaient selon le type de modalités sensorielles impliquées dans l'exploration des formes, visuelle, haptique et visuo-haptique.

Cependant, dans ce type d'études, les auteurs se sont traditionnellement heurtés à la problématique de l'échantillonnage séquentiel de l'information spatiale par le système haptique. Comparativement à la modalité visuelle, il est admis que l'identification de contours de formes bidimensionnelles est particulièrement difficile et coûteuse en temps. Les taux d'identification correctes relevés dans les études sur la perception haptique de formes en relief d'objets communs sont souvent faibles (Chapitre 1.1.2.3, Kennedy & Bai, 2002; Klatzky et al., 1993; Lederman et al., 1990; Loomis et al., 1991; Magee & Kennedy, 1980; Thompson et al., 2003). La vision est, en effet, habituellement avantagée spatialement, puisqu'elle permet d'accéder de manière simultanée à la scène entière, alors que la modalité haptique est contrainte d'acquérir l'information de manière séquentielle. En cas de présentation séquentielle de l'information spatiale, la résolution temporelle jouerait un rôle limitant sur le nombre d'échantillons successifs qui peut être transmis sans dégradation par l'entrée sensorielle impliquée. La mémoire de travail et l'intégration perceptive au cours du temps sont des processus déterminants lors de l'exploration haptique de formes. En effet, le maintien des informations échantillonnées séquentiellement en mémoire à court terme est nécessaire afin de pouvoir les intégrer au sein d'une représentation sensorimotrice globale de la forme et d'actualiser cette représentation au cours de l'exploration (Hatwell, 2000b).

Ainsi, quand il est question de comparer l'efficacité de plusieurs modalités sensorielles, il serait plus «équitable» de les faire correspondre, tant sur le mode d'acquisition de l'information que sur la quantité d'informations fournies. Loomis et ses collaborateurs (1991) ont montré, en comparant la reconnaissance visuelle et haptique de dessins en relief, que les taux et les temps de reconnaissance étaient pratiquement les mêmes dans les deux modalités lorsque l'information était recueillie séquentiellement plutôt qu'en parallèle. Selon les auteurs, la réduction du champ perceptif impliquerait bien une difficulté de l'acquisition de l'information et une réduction de sa vitesse. Il a souvent été proposé afin d'assurer un niveau suffisant de précision de la reconnaissance dans la modalité haptique, d'augmenter la durée de la période d'exploration de façon compensatoire. Toutefois, cette parade ne garantit pas le contrôle de l'équité de l'information fournie aux deux modalités sensorielles, surtout lorsque l'exploration haptique est libre, et n'empêche pas de surcroît le déséquilibre quant à la sollicitation de la mémoire de travail. Ainsi, nous avons préféré, afin de garantir l'accès à la même quantité d'informations et la même charge cognitive, proposer un même mode de présentation séquentiel de l'information dans les deux modalités sensorielles.

Dans cette étude, de manière générale, la vitesse d'apprentissage des formes pour les conditions impliquant la modalité visuelle devrait être plus importante, du fait de la spécialisation de la vision dans le traitement de l'information spatiale. Par ailleurs, nous espérons mettre en évidence un avantage de l'apprentissage multisensoriel. Quelques minutes après les apprentissages, la présentation multimodale visuelle et haptique des formes devrait permettre leur meilleure reconnaissance par rapport à la présentation visuelle ou haptique seule. Enfin, après deux jours de délai, l'apprentissage visuo-haptique devrait permettre de reconnaître visuellement un plus grand nombre de formes qu'un apprentissage visuel ou haptique seul.

8.2 Méthode

8.2.1 Matériel

Le dispositif expérimental comprenait un écran d'ordinateur dédié au contrôle du déroulement de l'expérience, un écran d'ordinateur placé dans le plan horizontal où le participant pouvait observer les formes, un clavier d'ordinateur permettant d'enregistrer ses réponses et un bras-robot Omni (Sensable[®]) placé sous l'écran d'ordinateur. Le bras robot

était utilisé pour guider haptiquement la main du participant le long des formes à apprendre et pour enregistrer le mouvement réel de la main. Le dispositif était piloté par un programme informatique (Microsoft® Visual C++) qui gérait les différentes phases expérimentales, l'enchaînement des essais, l'affichage visuel, le contrôle du bras-robot et l'enregistrement des réponses du participant.

8.2.1.1 Les stimuli

Les formes cibles

Vingt-quatre formes abstraites ont été construites à partir de la combinaison de quatre éléments : un segment de droite, une boucle et deux arcs elliptiques de rayons de courbure différents (Figure 39 pour des exemples, et Annexe C pour une présentation complète). Le premier élément constitutif des formes est un trait horizontal (1 cm), commun à l'ensemble des formes. Ainsi, tous les tracés débutaient dans la même direction avant de se différencier par un arrangement original des quatre éléments (soit 24 combinaisons possibles). A leur point de jonction, les éléments peuvent également être orientés différemment au sein des formes.

Chacune des formes a été acquise à l'aide d'une tablette graphique en condition normale d'écriture, de la gauche vers la droite. L'échantillonnage original de la tablette graphique était de 200 Hz. Les formes sont composées d'une série de 1059 à 1790 paires de coordonnées x, y. Pour chaque trace nous avons calculé sa longueur en mm et sa durée en secondes. Afin de garantir une durée et une amplitude identiques pour chaque forme nous avons normalisé la longueur totale (180 mm) et la durée de production de la trace (5 s).

Les formes distractrices

Les formes distractrices ont été construites à partir de chacune des formes cibles. Pour une forme cible donnée, un ensemble de 10 distracteurs a été élaboré. L'ordre des éléments constitutifs restait le même entre la cible et ses distracteurs mais l'orientation entre les éléments variait à leurs points de jonction. L'orientation entre éléments variait également entre les distracteurs d'une même forme cible. Les formes distractrices ont été acquises en condition normale d'écriture à l'aide d'une tablette graphique et de la même manière que pour les formes cibles.

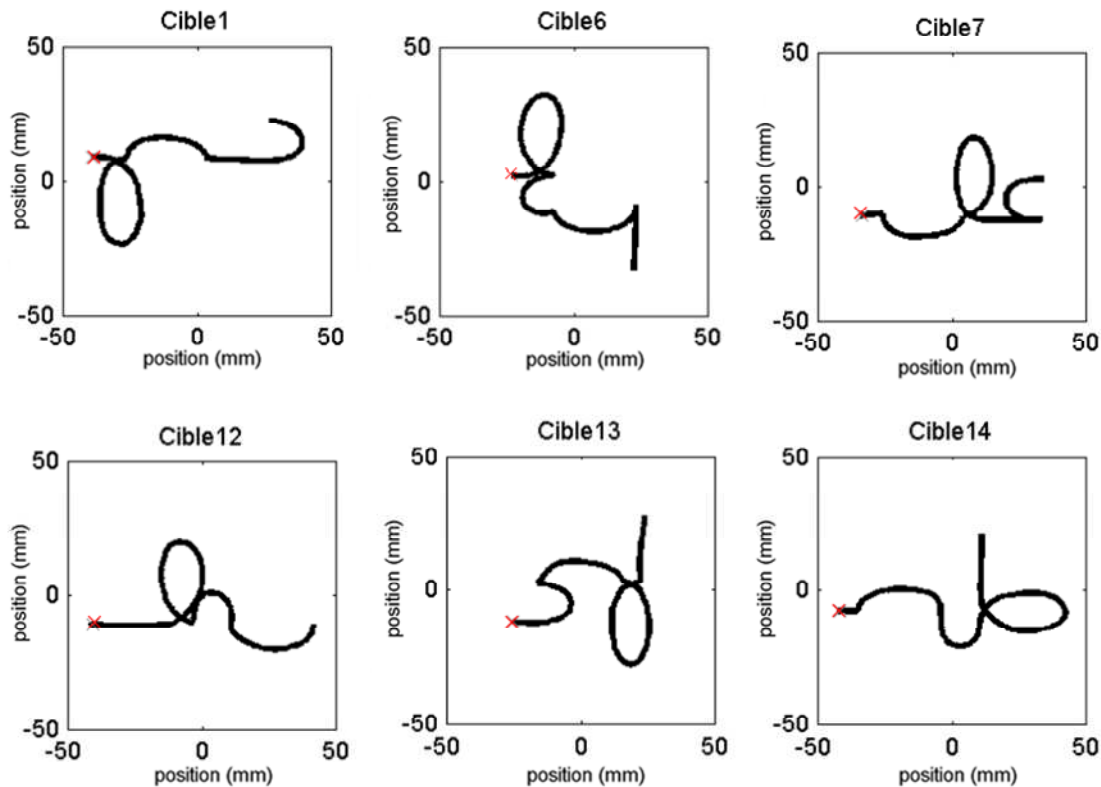


Figure 39. Six des 24 formes cibles utilisées dans l'étude. La longueur des trajectoires est normalisée à 180 mm. Les axes x et y indiquent la largeur et hauteur (en mm) des cibles lors de leur présentation. La croix rouge donne le point de départ de la forme.

8.2.2 Procédure

L'étude comportait plusieurs étapes distinctes, deux expériences prétests et la phase expérimentale proprement dite. Le premier prétest visait la sélection des formes abstraites distractrices qui étaient utilisées dans la phase expérimentale, en proposant une évaluation de la distance perceptive des couples cible/distracteur. Le second prétest permettait de vérifier que la géométrie globale de nos formes cibles pouvait être appréhendée à partir d'une présentation séquentielle, visuelle ou haptique, de la forme. Enfin la phase expérimentale était constituée d'une phase d'apprentissage des formes abstraites et de deux tâches de reconnaissance, après quelques minutes de délai et après 48 heures.

8.2.2.1 Distance perceptive cibles/distracteurs

Afin de sélectionner les distracteurs de notre étude, nous avons proposé à 12 adultes (7 femmes, 5 hommes, $m=25.5$ ans, $ET=3.8$ ans) de juger la distance perceptive entre chacune des 24 formes cibles et leur 10 formes distractrices respectives. Les participants devaient

«juger en utilisant [leurs] propres critères, la similarité entre chacune des paires de formes proposées» en attribuant, à l'aide d'une échelle, un score de similarité pouvant aller de 1 (très faiblement similaire) à 9 (très fortement similaire). Après avoir vérifié la fidélité inter-juges (alpha de Cronbach, $\alpha=0.93$), nous avons calculé un score moyen de similarité pour chaque couple cible/distracteur. Nous avons alors choisi de conserver les distracteurs aux scores de similarité perceptive moyen, qui étaient ni trop proches ni trop éloignés perceptivement de la forme cible. Au final, six formes distractrices pour chacune des cibles ont été utilisées dans l'expérience (Figure 40, soit un total de 144 distracteurs). Le score moyen de similarité pour l'ensemble des distracteurs choisis était de 5.09 ($ET=1.01$) et ne différait pas significativement de la note moyenne de 5, [$t_{(143)}=1,17$; $p>.20$].

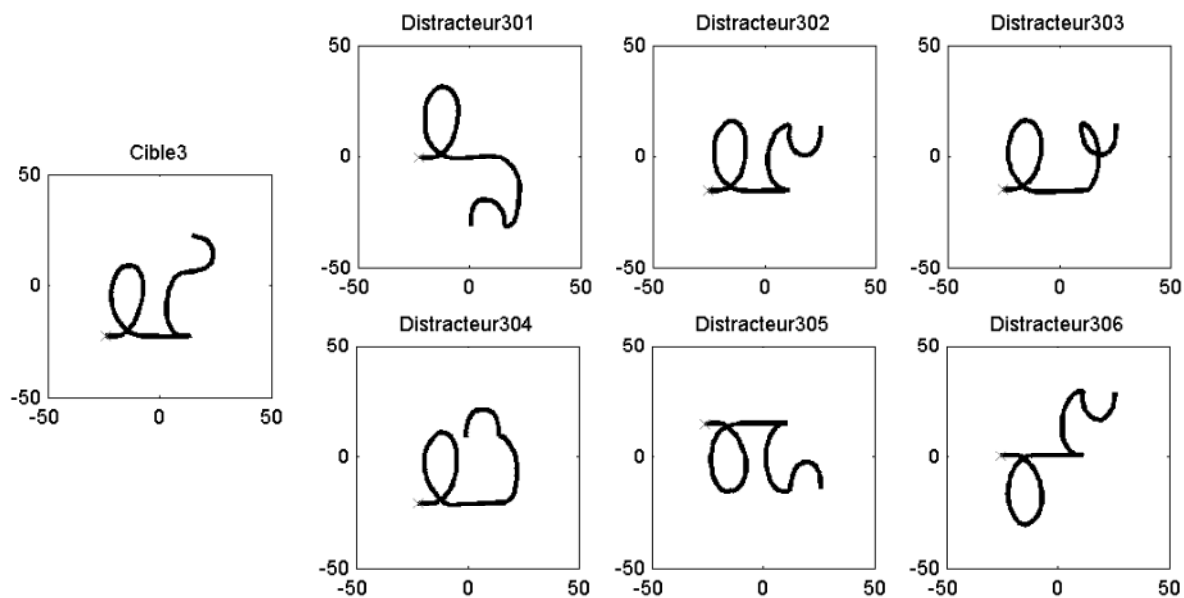


Figure 40. Exemple d'une cible et de ses six distracteurs. La longueur des distracteurs est également normalisées (180mm).

8.2.2.2 Prétest 2

Avant de soumettre nos formes cibles à l'apprentissage, nous avons voulu nous assurer que les adultes étaient capables d'appréhender la géométrie globale des formes suite à leur présentation séquentielle, visuelle ou haptique. L'acquisition sérielle de l'information, plutôt que simultanée, pourrait être à l'origine d'une lenteur et d'une difficulté d'identification des formes, quelle que soit la modalité sensorielle considérée (Loomis et al., 1991). De plus, les stimuli étant en deux dimensions, seules les informations de contours sont disponibles et

doivent être recueillies, maintenues et intégrées afin de reconstruire la forme globale. Les personnes pourraient alors souffrir d'un manque de capacités perceptives et/ou cognitives qui entrave ce mécanisme. Ainsi, nous avons proposé à deux groupes de personnes, deux modes de présentation séquentiel des formes cibles, visuel ou haptique, avant de leur demander de les reconnaître. De manière à contrôler l'exploration, lors de la présentation séquentielle haptique, le bras du participant était guidé par un dispositif haptique le long de la forme à découvrir. Malgré la séquentialité de la présentation, nous pensons que les participants seront en mesure de reconnaître une partie des formes proposées en reconstruisant la forme à partir des informations recueillies. Toutefois, nous attendons un taux de reconnaissance plus important et des réponses plus rapides suite à la condition de présentation visuelle. D'une part, la modalité visuelle est spécialisée dans le traitement de l'information spatiale. D'autre part, contrairement à la condition haptique, il n'est pas nécessaire, dans la condition visuelle, de confronter les informations recueillies via deux modalités sensorielles différentes. Il existerait un coût du transfert lors de la reconnaissance visuelle suite à une présentation haptique de l'information. Enfin, nous pensons que les performances seront plus variables suite à la présentation haptique, notamment à cause de capacités de transfert et/ou de compétences motrices qui peuvent être différentes selon les participants, notamment du fait de la particularité d'un mouvement assisté par un dispositif haptique.

Participants

Dix huit adultes droitiers (14 femmes, 4 hommes, $m=23.9$ ans, $ET=4.3$) ont participé à ce prétest. Les participants ont été aléatoirement répartis soit dans un groupe de présentation *visuelle* des formes (8 femmes, 1 homme, $m=25.6$ ans, $ET=5.48$), soit dans un groupe de présentation *haptique* (6 femmes, 3 hommes, $m=22.3$ ans, $ET=1.33$).

Matériel et Procédure

Pour chacune des conditions, les 24 formes cibles étaient présentées une à une dans un ordre aléatoire et de manière séquentielle. Suite à chaque présentation séquentielle, la forme cible, ou son distracteur, était présentée visuellement de manière statique à l'écran. Les participants devaient alors indiquer si la forme statique correspondait ou non à la forme visuelle ou haptique précédente (pour un total de 48 présentations).

Dans la condition de présentation visuelle, les formes étaient tracées séquentiellement sur un écran d'ordinateur. Le participant pouvait voir, sur fond noir, un point lumineux (2 mm de diamètre) en mouvement qui parcourait la forme sans laisser de trace visible à l'écran.

Dans cette condition de présentation, la forme globale ne peut être appréciée qu'en intégrant les positions successives du point au cours des cinq secondes que dure la présentation visuelle.

Dans la condition haptique, la main droite du participant était guidée par le bras robot le long de la forme et aucune information visuelle n'était disponible. Le participant devait donc se fier aux forces et mouvements générés par le bras robot le long de la forme pour l'appréhender. Le participant doit intégrer les positions successives de son bras au cours des cinq secondes que dure la présentation haptique pour apprécier la forme globale du stimulus.

Suite à la présentation séquentielle, visuelle ou haptique, d'une forme cible, la forme cible, ou son distracteur, était présentée visuellement de manière statique à l'écran (une seconde après que le dernier point de la forme cible ait été affiché). Le participant devait alors indiquer, le plus rapidement possible à l'aide d'un boîtier réponse placé sous sa main gauche, si la forme présentée était identique ou différente de la forme présentée au préalable. Nous avons recueilli les temps de réaction et calculé, pour chaque condition, les taux de réponses correctes, c'est-à-dire le nombre de reconnaissances correctes de cibles et de rejets corrects de distracteurs sur l'ensemble des présentations (Tableau 12).

Résultats

Tableau 12. Taux moyens de réponses correctes, temps de réponse moyens et (écarts-types) pour les deux modes de présentation visuelle et haptique des formes.

Type de présentation	Visuelle	Haptique
Taux de réponses correctes	0.85 (0.06)	0.70 (0.09)
Temps de réponse (ms)	1586 (381)	2411 (818)

Des tests t de Student sur les taux de réponses correctes et les temps de réponses ont été réalisés. Cette analyse révèle un effet du type de présentation [$t_{(16)}=3.05$, $p<.05$] : les adultes reconnaissent davantage de formes cibles et rejettent davantage de distracteurs après une présentation visuelle ($m=85\%$ de réponses correctes), qu'après une présentation haptique ($m=70\%$). De même, les adultes répondaient plus rapidement après une présentation visuelle ($m=1586$ ms), qu'après une présentation haptique ($m=2411$ ms), [$t_{(16)}=3.23$, $p<.05$].

Par ailleurs, nous avons analysé la variabilité des réponses et des temps de réaction au sein des deux groupes de présentation. Afin de normaliser les données, nous avons appliqué

une transformation logarithmique à l'ensemble des écarts-types individuels pour les deux mesures. Les résultats des tests t de Student révèlent que les participants répondaient de manière plus variable suite à une présentation haptique des formes cibles ($m=0.46$) que visuelle ($m=0.35$), [$t_{(16)}=2.99$, $p<.05$]. De même, les temps de réponses étaient plus variables suite à une présentation haptique ($m=1101$) que visuelle ($m=709$), [$t_{(16)}=2.6$, $p<.05$].

Discussion

Les résultats du prétest montrent que suite à une présentation séquentielle des formes, les participants étaient capables de les reconnaître correctement ($m=78\%$) et rapidement ($m=2033$ ms) lorsqu'elles étaient présentées visuellement et de manière statique à l'écran. Contrairement aux études qui impliquaient une identification de formes familières en deux dimensions (Loomis et al., 1991), dans une tâche de reconnaissance de formes abstraites, nous obtenons de bonnes performances, largement au dessus du niveau de chance, dans les deux modalités sensorielles. Les participants seraient capables de traiter l'information de forme du local vers le global. Toutefois, bien que les taux et les temps de reconnaissance visuelle après l'exploration haptique de la forme soient satisfaisants, les résultats montrent que les performances après l'exploration visuelle, même séquentielle, restaient supérieures. Se pose alors la question de la quantité d'informations transférable d'une modalité sensorielle à l'autre. En effet, les temps d'exploration et la quantité d'information délivrée à chaque modalité sensorielle étant strictement les mêmes, nous supposons que la principale difficulté rencontrée par les personnes était de confronter les informations recueillies dans deux modalités sensorielles différentes. Bien que le passage des informations spatiales soit considéré dans la littérature comme beaucoup plus facile de la modalité haptique vers la modalité visuelle que l'inverse, les performances dans la reconnaissance explicite de formes anciennes et nouvelles sont généralement meilleures en condition intramodale qu'en condition intermodale (Hatwell, 2000a). Il existe un coût au transfert intersensoriel de l'information. Il convient donc de noter, qu'il est probable qu'un apprentissage haptique de formes souffre toujours de moins bonnes performances lorsqu'il s'agit de les reconnaître visuellement par la suite, par rapport à un apprentissage visuel.

Nous avons également noté que les performances (taux et temps de reconnaissance) suite à la présentation haptique de l'information étaient plus variables qu'après une présentation visuelle. Ces résultats pourraient être dus à des compétences motrices inégales entre les participants mais aussi à des capacités de transfert intermodal différentes. D'après Ohlmann (1990), il est possible qu'il existe des différences interindividuelles dans le

processus de transfert intermodal de l'information en raison d'une hiérarchisation différente des modalités sensorielles d'un individu à l'autre.

8.2.2.3 Phase expérimentale

Dans cette étude nous avons proposé d'ajouter la modalité haptique dans l'exploration de formes abstraites bidimensionnelles afin de vérifier si un apprentissage multisensoriel (visuo-haptique) était plus efficace qu'un entraînement unimodal (visuel ou haptique) pour reconnaître visuellement les formes par la suite.

Participants

Dix huit adultes droitiers (9 femmes, 9 hommes), âgés en moyenne de 28.2 ans ($ET=3.6$) ont participé à cette expérience. L'ensemble des participants apprenait, au cours d'une séance unique, 15 formes (tirées aléatoirement parmi les 24 possibles) dans trois conditions d'apprentissage différentes (5 formes par condition) qui impliquaient soit une seule modalité sensorielle pour explorer les formes, dans les conditions Visuelle (V) et Haptique (H), soit les deux modalités sensorielles, dans la condition visuo-haptique (VH). L'ordre d'enchaînement des trois conditions était tiré au hasard parmi les six ordres possibles (3 participants par ordre).

Phase d'apprentissage

Pendant la *phase d'apprentissage*, les participants alternaient des *phases de présentation* des formes cibles et des *phases tests* où ils devaient reconnaître les formes cibles parmi des formes distractrices, afin de contrôler le niveau de leur apprentissage. Lors de la *phase de présentation*, les cinq cibles à apprendre étaient présentées dans un ordre aléatoire à l'intérieur d'un même bloc. Un essai débutait par une croix de fixation (500 ms) suivie d'un bip sonore et d'un délai de 500 ms avant la présentation séquentielle de la forme. Avant que l'essai suivant ne débute, un délai d'une seconde était introduit dans la condition visuelle. Dans les conditions haptique et visuo-haptique, un délai de 2.5 secondes était nécessaire pour que le bras robot vienne se positionner sur le nouveau point de départ.

A l'issue d'un bloc de cinq présentations, dans une condition donnée, l'expérimentateur pouvait présenter à nouveau les cinq formes cibles (phase de présentation) ou tester les capacités de reconnaissance du participant (phase de test). Pendant la phase d'apprentissage, qui durait en moyenne 1h45, chaque participant alternait des phases de présentation des cibles et des phases de test jusqu'à l'atteinte du critère d'apprentissage fixé à 80% de réponses correctes (reconnaisances et rejets corrects). Le nombre de blocs

nécessaires à l'atteinte du critère d'apprentissage pour chacune des conditions est pris en compte pour l'analyse.

Présentation visuelle

Dans la condition visuelle, les formes étaient tracées séquentiellement sur un écran d'ordinateur placé dans le plan horizontal. Le participant voyait uniquement un point lumineux en mouvement, sur fond noir, qui parcourait la forme sans laisser de trace visible. Le programme permet de mouvoir le point (2 mm de diamètre) à des positions successives avec une fréquence de rafraîchissement de 60 Hz. Pour une forme donnée, le point défini par les coordonnées x_1, y_1 est tracé en premier au temps t_0 . Le tracé se termine lorsque le dernier point de la série originale (x_n, y_n) est appelé pour le calcul du point courant. A chaque rafraîchissement de l'écran un seul point est tracé et la forme globale ne peut être estimée qu'en intégrant les positions successives du point au cours des cinq secondes que dure la présentation visuelle. Afin d'éviter une gêne visuelle liée à la soudaine apparition et disparition du point lumineux au début et à la fin de la présentation, le point était présenté statiquement pendant 350 ms aux points x_1, y_1 et x_n, y_n .

Présentation Haptique

Dans cette condition, la main droite du participant était guidée par le bras robot le long de la forme et aucune information visuelle n'était disponible. La personne percevait via ses récepteurs tactilo-kinesthésiques les forces et mouvements générés par le bras robot le long de la forme à apprendre. La boucle de contrôle du robot fonctionne à une fréquence de 1000Hz. Le programme permet de positionner le bras robot au point x_1, y_1 , et z_0 (la position de référence le long de l'axe vertical (z) est fixée). Au début d'un essai, la position est contrainte par un ressort virtuel (raideur $k=0.6$ N/mm). Le programme calcule la position désirée (x_d, y_d) du bras robot (et de la main) à chaque boucle de contrôle (1 ms). La position désirée est celle qui correspond à la forme originale et doit être suivie par la main du participant. Afin de fournir des informations tactilo-kinesthésiques et contraindre suffisamment le mouvement de la main du participant le long de la forme virtuelle, le programme simule un ressort (raideur $k=0.2$ N/mm) tendu entre la position réelle de la main, mesurée par le robot (x_a, y_a) , et la position désirée (x_d, y_d) au temps t_i . Ce ressort définit deux forces, dans l'axe (x), $f_x = k \cdot (x_d - x_a)$, et dans l'axe (y), $f_y = k \cdot (y_d - y_a)$, qui se combinent pour produire une force en direction de la position désirée $f_t = \sqrt{(f_x^2 + f_y^2)}$. En fonction de la raideur choisie, s'il existe un écart de 5 mm par rapport à la trajectoire désirée au temps t_i , le bras robot génère une force de 1N ($1 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$) dirigées vers la position désirée. Compte tenu de la consigne, qui était

d'accompagner au mieux le mouvement du robot, le niveau de raideur choisi optimise le guidage de la main et la fluidité du mouvement du robot. Ce type de guidage haptique conduit à une bonne reproduction de la trajectoire et de la cinématique des cibles (Figure 41). L'écart-spatial moyen, c'est-à-dire la distance moyenne en millimètre entre la position réelle du stylet au cours du mouvement et la trace idéale (échantillonnées à 100Hz), calculée sur les axes (x) et (y) pour l'ensemble des présentations au cours de l'apprentissage, était en moyenne de 3.9 mm ($ET=1.2$).

Présentation Visuo-Haptique

Dans cette condition, le participant bénéficiait des deux modalités sensorielles simultanément pour explorer les formes à apprendre. La main du participant était guidée par le dispositif haptique et il pouvait voir simultanément sur l'écran un point lumineux en mouvement parcourant la forme. Le participant n'avait pas de vision directe de sa main : le dispositif haptique était situé sous l'écran de manière à ce que les informations visuelles et haptiques concordent spatialement. Les deux conditions précédentes sont donc combinées. Cependant, l'information visuelle donnée au participant correspondait à la position de sa main en temps réel (qui suivait la trajectoire désirée) et non à la trajectoire désirée. Cette solution a été préférée à l'alternative qui consiste en la présentation de la forme idéale pour éviter, en cas d'écarts à la trajectoire, une décorrélation spatio-temporelle entre les entrées visuelles et haptiques qui pourrait gêner les participants et être néfaste à l'apprentissage. Toutefois comme nous pouvons le voir dans la Figure 41, les deux trajectoires, désirée et effective, restaient proches. L'écart-spatial moyen, pour l'ensemble des présentations au cours de l'apprentissage, était en moyenne de 3,8 mm ($ET=1.6$).

Phase test

Suite aux phases de présentation, les participants étaient évalués sur leurs capacités à reconnaître les formes cibles afin de vérifier le niveau de leur apprentissage. Au cours de cette phase test, les formes cibles et distractrices associées étaient présentées dans la même modalité que lors de leur apprentissage. Cependant, suite à la présentation séquentielle de la forme, le participant devait indiquer, à l'aide du clavier (main non dominante), si oui ou non la forme présentée faisait partie des formes cibles à apprendre. Cinq formes cibles sont présentées dans un ordre aléatoire parmi cinq distracteurs (un par cible). La réponse et le temps de réponse sont enregistrés. A chaque réponse donnée par le participant, un retour est donné sur sa réponse. A l'issue du test, le pourcentage de reconnaissances correctes s'affiche sur l'écran de contrôle de l'expérimentateur, qui peut choisir de lancer une nouvelle phase

d'apprentissage ou, en cas d'atteinte du critère d'apprentissage (fixé à 80%), choisir de passer à l'apprentissage dans la modalité sensorielle suivante.

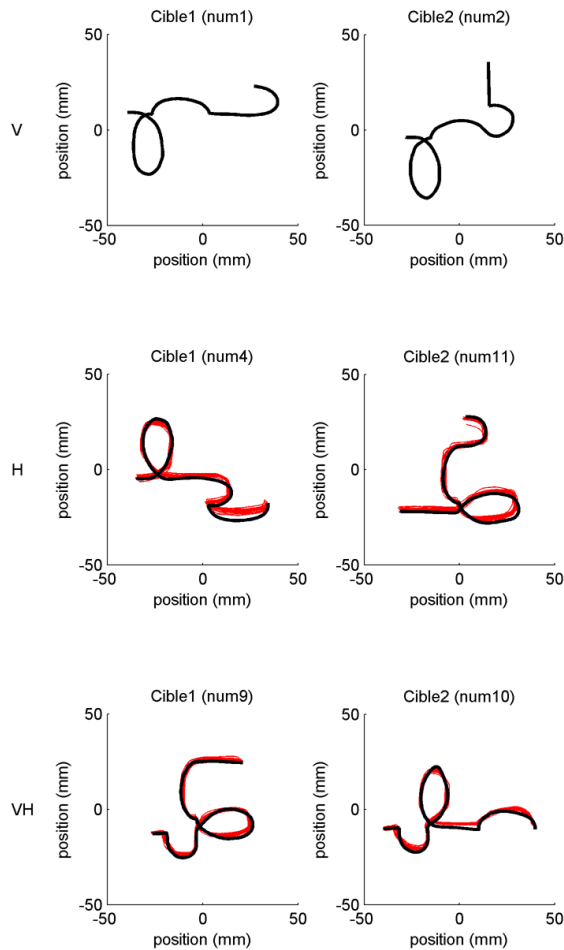


Figure 41. Exemple de formes cibles (lignes noires) proposées pour un des 18 participants de l'expérience dans les conditions d'apprentissage visuel (V), haptique (H) et visuo-haptique (VH). Les lignes rouges représentées sur les cibles en conditions V et VH représentent les formes réellement produites par le bras robot (pour $n = 7$ présentations).

Reconnaissance des formes cibles

Test mixte

A l'issue des trois apprentissages et après quelques minutes de pause (~5 min), le niveau de connaissance des 15 formes cibles était évalué. Dans un test, dit *mixte*, les 15 formes cibles apprises, quelle que soit la condition d'apprentissage, étaient présentées aléatoirement parmi 15 distracteurs (un par cible). Comme pour la phase de test, le participant devait indiquer, le plus rapidement et précisément possible à l'aide du clavier d'ordinateur, si la forme avait été apprise ou s'il s'agissait d'une nouvelle forme. Le programme permet de présenter chaque cible dans sa modalité d'apprentissage. Les distracteurs étaient présentés dans la même modalité que la forme cible à laquelle ils sont associés. L'ordre des présentations étant aléatoire, la modalité sollicitée pouvait donc changer d'un essai à l'autre.

Des instructions apparaissaient à l'écran avant chaque essai afin d'indiquer au participant la condition de présentation de la forme à venir. Nous avons recueilli les temps de réaction et calculé, pour chaque condition, le nombre de réponses correctes (reconnaisances correctes des cibles et rejets corrects des distracteurs).

Tâche de connaissance de la forme globale

Quarante huit heures après la phase d'apprentissage, les 15 formes apprises dans les trois modalités, ainsi que 15 nouveaux distracteurs, ont été présentés visuellement et de manière statique. Un essai commençait par une croix de fixation (500 ms) suivie d'un délai de 500 ms avant qu'une forme ne s'affiche simultanément à l'écran. Le participant devait alors indiquer, le plus rapidement et le plus précisément possible à l'aide d'un clavier d'ordinateur, si la forme présentée avait été apprise ou non deux jours auparavant, quelle que soit sa condition d'apprentissage. La forme restait visible au maximum cinq secondes à l'écran, temps qui équivalait à la durée de présentation lors de la phase d'apprentissage. Au cours de ce dernier test, seuls les indices géométriques pouvaient permettre au participant de décider si la forme avait été apprise ou non. Chaque personne effectuait deux fois le test, soit un total de 30 présentations. Le nombre de réponses correctes et les temps de réponse étaient recueillis.

8.3 Résultats

8.3.1 Phase d'apprentissage

Le nombre moyen de blocs d'apprentissage et les taux moyens de réponses correctes (et les écarts-types) données par les adultes après leur apprentissage sont présentés dans le Tableau 13.

Tableau 13. Nombre moyen de blocs d'apprentissage et taux moyens de réponses correctes en fonction des formes cibles et distractrices, pour les trois modalités d'apprentissage visuelle, haptique et visuo-haptique. (Les écarts-types figurent entre parenthèses).			
Modalité d'apprentissage	Visuelle	Haptique	Visuo-haptique
Nombre de blocs	9.22 (1.90)	11.77 (1.75)	10.33 (1.67)
Taux de réponses correctes	0.96 (0.06)	0.89 (0.10)	0.94 (0.08)
- Cibles	0.98 (0.05)	0.91 (0.14)	0.94 (0.11)
- Distracteurs	0.93 (0.09)	0.88 (0.19)	0.94 (0.11)

Dans un premier temps, nous avons vérifié que les participants avaient bien atteint, au dernier bloc, le critère d'apprentissage pour chaque type d'apprentissage sensoriel. Les analyses révèlent que les participants avaient bien appris les formes suite à une présentation visuelle [$t_{(17)}=10.7, p<.001$], haptique [$t_{(17)}=3.80, p<.01$] et visuo-haptique [$t_{(17)}=7.16, p<.001$], les pourcentages de réponses correctes étant significativement supérieurs au seuil d'apprentissage désiré (80%).

Nous avons également vérifié qu'au dernier essai, le niveau d'apprentissage était le même pour toutes les conditions d'apprentissage. Une *ANCOVA* 3 (modalité d'apprentissage) \times 2 (type de forme) sur les taux de réponses correctes a été réalisée, avec l'ordre d'apprentissage en covariant. Cette analyse révèle une tendance pour le facteur type de forme [$F_{(1,16)}=4.07, p=.06$] : un nombre plus important de formes cibles avait tendance à être correctement reconnu ($m=0.95$) que de distracteurs correctement rejetés ($m=0.92$). L'effet principal de la modalité d'apprentissage [$F_{(2,32)}=2.06, p>.05$] et l'interaction (apprentissage \times forme) [$F_{(2,32)}=0.19, p>.05$] ne sont pas significatifs.

Afin d'évaluer la vitesse d'apprentissage des formes, une *ANOVA* 3 (modalité d'apprentissage) \times 6 (ordre) sur le nombre de blocs de présentations nécessaires à l'atteinte du critère d'apprentissage a été réalisée. Cette analyse révèle un effet significatif de la modalité d'apprentissage [$F_{(2,24)}=19.95, p<.01$]. L'analyse a posteriori (*HSD* de Tukey) révèle qu'un nombre moins important de présentations était nécessaire pour apprendre dans la modalité visuelle par rapport à la modalité haptique ($p<.01$). Le nombre de blocs de présentation avait également tendance à être moins important pour la modalité visuo-haptique qu'haptique ($p=.07$). Enfin, le nombre de présentations nécessaire à la modalité visuelle et visuo-haptique était équivalent. L'effet principal de l'ordre des apprentissages [$F_{(5,12)}=0.82, p>.05$] et l'interaction (apprentissage \times ordre) [$F_{(10,24)}=0.60, p>.05$] ne sont pas significatifs.

La Figure 42 représente une estimation des courbes moyennes d'apprentissage pour chacune des modalités sensorielles à partir des taux de réponses correctes des participants recueillis après chaque bloc de présentation (phase test) de la phase d'apprentissage.

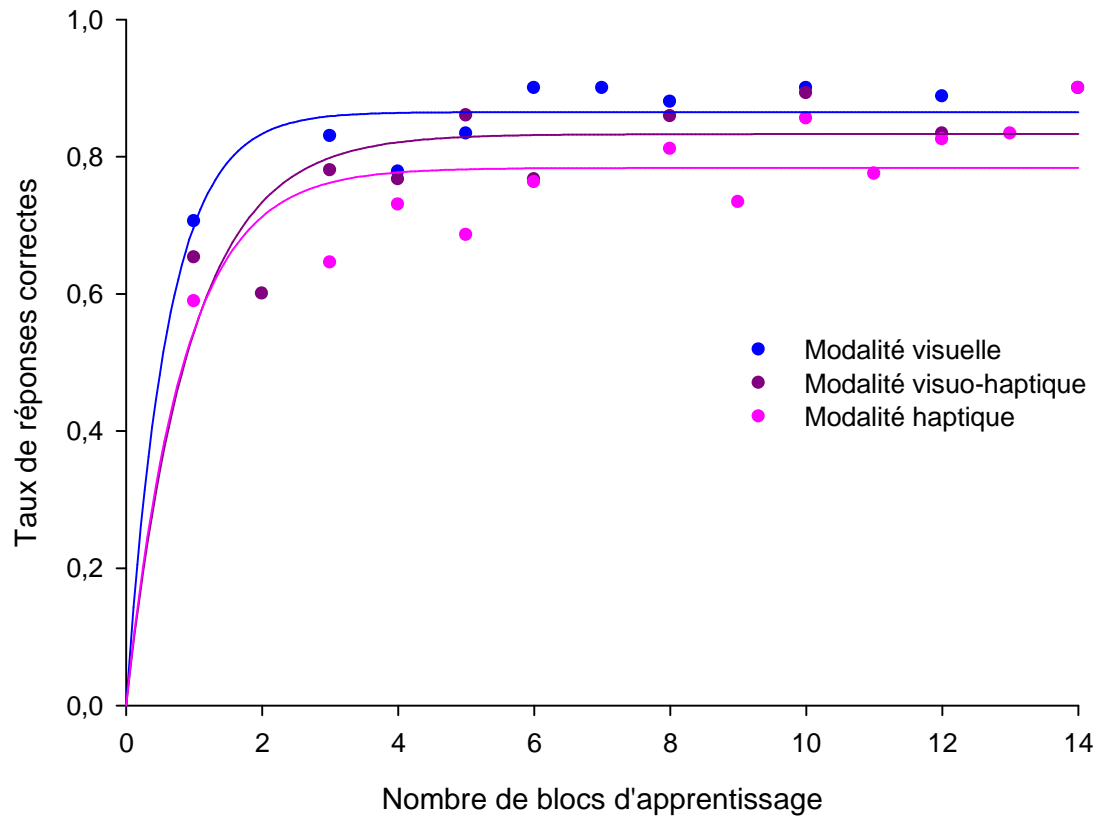


Figure 42. Les points représentent les taux de réponses correctes moyens après chaque bloc de présentation de la phase d'apprentissage, pour les 18 participants, en fonction de la modalité d'apprentissage (visuelle, haptique ou visuo-haptique). Les courbes exponentielles représentent l'évolution du taux d'apprentissage moyen pour l'ensemble des participants en fonction du nombre de blocs de présentation dans les trois modalités sensorielle, estimées par la méthode du « Maximum de Vraisemblance ».

8.3.2 Test mixte

Les taux moyens de réponses correctes données par les adultes après leur apprentissage et les temps de réponse moyens (et les écarts-types) sont présentés dans le Tableau 14.

Dans un premier temps nous avons vérifié que les taux de réponses correctes obtenus au test mixte étaient différents du hasard pour chaque modalité sensorielle à l'aide de tests t de Student. L'ensemble des résultats montrent que les performances étaient au dessus du niveau de chance ($p < .001$).

Tableau 14. Taux moyen de réponses correctes et temps de réponse en fonction des formes cibles et distractrices, pour les trois modalités d'apprentissage visuelle, haptique et visuo-haptique. (Les écarts-types figurent entre parenthèses).

Modalité d'apprentissage	Visuelle	Haptique	Visuo-haptique
Taux de réponses correctes	0.84 (0.11)	0.75 (0.15)	0.78 (0.14)
- Cibles	0.83 (0.15)	0.71 (0.25)	0.77 (0.17)
- Distracteurs	0.85 (0.16)	0.79 (0.24)	0.79 (0.25)
Temps de réponse (ms)	1916 (573)	2398 (608)	2217 (716)
- Cibles	1836 (661)	2287 (742)	2194 (828)
- Distracteurs	1956 (624)	2422 (764)	2274 (762)

Note : Les Temps de réponse supérieurs à deux écarts-types par rapport à la moyenne des temps de réponse des participants ont été retirés de l'échantillon.

Une *ANOVA* 2 (modalité d'apprentissage) \times 2 (type de formes) sur les taux de réponses correctes et les temps de réponse ont été réalisées.

L'analyse des taux de réponses correctes révèle une tendance pour le facteur modalité d'apprentissage [$F_{(2,34)}=3.17$, $p=.055$]. L'analyse a posteriori (*HSD* de Tukey) révèle uniquement une tendance à reconnaître davantage de formes cibles et rejeter davantage de distracteurs après un apprentissage visuel par rapport à un apprentissage haptique ($p=.05$). L'effet principal du type de formes [$F_{(1,17)}=1.14$, $p>.05$] et l'interaction (apprentissage \times formes) [$F_{(2,34)}=0.17$, $p>.05$] ne sont pas significatifs.

L'analyse des temps de réponses révèle un effet principal de la modalité d'apprentissage [$F_{(2,34)}=8.43$, $p<.01$]. L'analyse a posteriori (*HSD* de Tukey) montre que les participants répondaient de manière correcte plus rapidement après un apprentissage visuel par rapport à un apprentissage haptique ($p<.01$) ou visuo-haptique ($p<.05$). Ces deux derniers types d'apprentissages ne diffèrent pas significativement entre eux. L'effet principal du type de formes [$F_{(1,17)}=0.99$, $p>.05$] et l'interaction (apprentissage \times formes) [$F_{(2,34)}=0.03$, $p>.05$] ne sont pas significatifs.

8.3.3 Test de reconnaissance de la forme globale

Les taux moyens de réponses correctes données par les adultes deux jours après leur apprentissage et les temps de réponse moyens (et les écarts-types) sont présentés dans le Tableau 15.

Dans un premier temps nous avons vérifié que les taux de réponses correctes obtenus après deux jours de délai étaient toujours différents du hasard pour chaque modalité sensorielle à l'aide de tests t de Student. L'ensemble des résultats montre que les performances étaient au dessus du niveau de chance ($p < .001$) sauf pour la reconnaissance des formes cibles suite à l'apprentissage visuo-haptique ($p = .058$) et haptique ($p > .05$).

Tableau 15. Taux moyens de réponses correctes et temps de réponse en fonction des formes cibles et distractrices, pour les trois modalités d'apprentissage visuelle, haptique et visuo-haptique. (Les écarts-types figurent entre parenthèses).

Modalité d'apprentissage	Visuelle	Haptique	Visuo-haptique
Taux de réponses correctes	0.72 (0.13)	0.63 (0.13)	0.64 (0.13)
- Cibles	0.72 (0.24)	0.5 (0.20)	0.58 (0.16)
- Distracteurs	0.71 (0.15)	0.75 (0.13)	0.71 (0.16)
Temps de réponse (ms)	2301 (367)	2504 (713)	2258 (631)
- Cibles	2651 (504)	2616 (668)	2652 (615)
- Distracteurs	2456 (399)	2489 (547)	2493 (518)

Note : Les Temps de réponse supérieurs à deux écarts-types par rapport à la moyenne des temps de réponse des participants ont été retirés de l'échantillon.

Deux ANOVA 2 (modalité d'apprentissage) \times 2 (type de formes) sur les taux de réponses correctes et les temps de réponse ont été réalisées.

L'analyse des taux de réponses correctes révèle un effet principal du facteur modalité d'apprentissage [$F_{(2,34)}=4.28$, $p < .05$]. L'analyse *a posteriori* (HSD de Tukey) révèle que les taux de réponses correctes étaient significativement plus importants après un apprentissage visuel qu'après un apprentissage haptique ($p < .05$). Il existait aussi une tendance à donner davantage de réponses correctes après un apprentissage visuo-haptique comparativement à un apprentissage haptique ($p = .086$). Enfin, les performances après les apprentissages visuel et visuo-haptique étaient équivalentes. L'effet principal du type de formes est significatif [$F_{(1,17)}=8.26$, $p < .05$], les participants rejetaient davantage de distracteurs qu'ils ne

reconnaissaient de cibles. L'interaction (apprentissage × formes) [$F_{(2,34)}=6.88$, $p<.01$] est significative (Figure 43). Les analyses *a posteriori* (HSD de Tukey) révèlent que les formes cibles étaient moins bien reconnues après un apprentissage haptique et visuo-haptique que visuel (respectivement $p<.01$ et $p=.06$). De plus, les cibles apprises à l'aide de la modalité haptique étaient moins bien reconnues que n'étaient rejetés les distracteurs dans toutes les modalités sensorielles (tous les $p<.01$). Enfin, les distracteurs étaient mieux rejetés dans la modalité haptique que les cibles reconnues dans la modalité visuo-haptique ($p<.05$).

L'analyse des temps de réponse révèle un effet principal du type de formes [$F_{(1,17)}=7.60$, $p<.05$]. Les distracteurs étaient rejetés plus rapidement que n'étaient reconnues les formes cibles. L'effet principal de la modalité d'apprentissage [$F_{(2,34)}=0.60$, $p>.05$] et l'interaction (apprentissage × formes) [$F_{(2,34)}=0.78$, $p>.05$] ne sont pas significatifs.

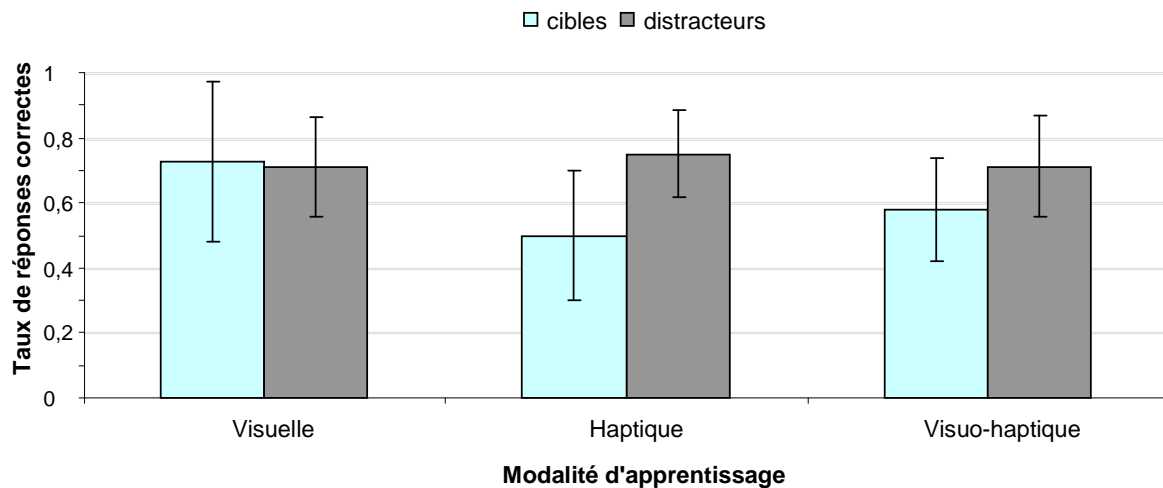


Figure 43. Taux de réponses correctes moyens (et écarts-types) pour l'ensemble des formes cibles et distractrices en fonction de la modalité d'apprentissage (visuelle, haptique ou visuo-haptique).

8.4 Discussion

Dans cette étude, nous avons émis l'hypothèse générale qu'un apprentissage multisensoriel permettrait à des adultes de mieux mémoriser des formes abstraites bidimensionnelles, par un double codage visuel et haptique de l'information spatiale, par rapport à un apprentissage unisensoriel visuel ou haptique. Pour tester cette hypothèse, les participants ont été invités à apprendre 15 nouvelles formes abstraites dans trois conditions (5 formes par condition) qui différaient selon le type de modalités sensorielles impliquées dans l'exploration des formes : visuelle, haptique et visuo-haptique.

Les premiers résultats concernent la phase d'apprentissage. Les participants ont été capables d'apprendre, pour chaque type d'apprentissage (multisensoriel ou unisensoriel), 80% des 15 formes cibles après une moyenne de 10.44 ($ET=2.06$) présentations pour chacune des formes. Toutefois, la durée de l'apprentissage, le nombre de présentations nécessaire pour atteindre le critère d'apprentissage des formes, était plus important pour la condition impliquant la modalité haptique que pour les deux autres conditions, visuelle et visuo-haptique. Il semblerait qu'une pratique plus importante des gestes d'exploration des formes soit nécessaire pour qu'un effet bénéfique puisse être observé sur leur mémorisation. Avec une pratique suffisante, la mémoire motrice devient progressivement moins fragile (Karni et al., 1998). Par ailleurs, il se pourrait que la nécessité d'un plus grand nombre de répétitions soit dû à la difficulté du traitement spatial de l'information et à la finesse de la discrimination demandée entre formes anciennes et nouvelles au sein de la modalité haptique.

Quelques minutes après les apprentissages, les participants étaient capables de reconnaître correctement un nombre important de formes cibles apprises (et de rejeter correctement les formes distractrices) au sein de chacune des modalités d'apprentissages, visuelle, haptique et visuo-haptique ($m=79\%$). Cependant, les résultats montrent une tendance à donner davantage de réponses correctes après un apprentissage visuel par rapport à un apprentissage haptique. Nous avons vu qu'avec une pratique suffisante, une mémoire motrice liée à la forme s'installait puisque le critère d'apprentissage que nous nous étions fixé (80%) avait pu être atteint. Toutefois, Karni *et al.* (1998) proposent qu'une amélioration rapide de la mémoire motrice (*apprentissage rapide*, de l'ordre de la minute), au cours des sessions, puisse exister mais qu'elle soit plutôt le reflet de la mise en place d'une stratégie de traitement afin de résoudre une tâche perceptive particulière et ne reflèterait pas une modification des représentations impliquées. Ainsi, au cours de l'apprentissage les participants seraient donc capables de traiter l'information de manière efficace lors des blocs de présentation afin de parvenir à faire la différence entre les formes présentées et les formes nouvelles au moment des phases tests. Les auteurs ajoutent, qu'un réel gain de performance serait déclenché par une pratique plus intensive, qui évoluerait lentement (*apprentissage lent*), et se manifesterait entre 6h et 8h après l'apprentissage. Dans ce cadre, suite à un apprentissage haptique de formes, les participants auraient besoin de davantage de temps pour montrer des performances plus importantes dans une tâche de reconnaissance. Dans ce sens, il n'est pas surprenant dans notre étude de constater que l'apprentissage VH n'apportait pas immédiatement de bénéfice supplémentaire, même si deux sources d'informations étaient proposées pour reconnaître les formes.

Concernant l'analyse des temps de réponse, nous avons constaté que les réponses étaient plus rapides dans la condition visuelle, qu'haptique ou visuo-haptique. Le coût temporel observé lors de l'implication de la modalité haptique pourrait être simplement dû à la difficulté de manipuler l'information spatiale au sein de cette modalité.

Après deux jours de délai, les participants étaient capables, à partir d'une présentation visuelle statique de la forme, de faire correctement la différence entre les formes apprises et nouvelles pour 66% des 15 formes proposées, pour l'ensemble des méthodes d'apprentissage (multisensorielle ou unisensorielle). Cette faiblesse de résultats est principalement due aux apprentissages H et VH puisqu'ils ne permettaient pas de reconnaître correctement les formes cibles apprises ($m=54\%$). Les résultats montrent que les participants donnaient davantage de réponses correctes après un apprentissage visuel qu'haptique et avaient tendance à donner davantage de réponses correctes après un apprentissage multisensoriel par rapport à un apprentissage haptique. Plus précisément, les résultats révèlent que suite à un apprentissage visuel, les taux de réponses correctes restaient importants ($m=72\%$) deux jours après la fin de l'apprentissage et qu'autant de formes cibles et distractrices étaient reconnues. Pour les apprentissages haptique et multisensoriel (VH), les formes distractrices étaient aussi bien rejetées ($m=72\%$) qu'après l'apprentissage visuel, alors qu'en parallèle, un effondrement au niveau du hasard de la reconnaissance visuelle des formes apprises était à noter.

Concernant la faiblesse des performances suite à l'apprentissage dans la modalité haptique, il est possible qu'il soit plus difficile de passer d'une mémoire motrice du geste à une image visuelle précise des formes, lorsque l'apprentissage est éloigné dans le temps. En d'autres termes, la description interne sérielle de la forme pourrait être difficile à comparer à la description simultanée proposée.

De plus, l'ajout d'une pratique motrice autour des formes ne permet pas une reconnaissance visuelle plus facile et rapide. Bien que l'apprentissage moteur ait été démontré dans l'entraînement haptique, le double codage visuel et moteur, susceptible d'intervenir au cours de l'entraînement multisensoriel, n'apportait pas de bénéfice supplémentaire pour la reconnaissance visuelle des formes par rapport à un apprentissage visuel. Même si l'information spatiale sur les formes fournie aux deux modalités était redondante, il est possible que la situation multimodale ait été coûteuse en attention (Spence & Driver, 1997). Le traitement attentionnel fourni dans une modalité se répercuterait sur le traitement effectué par la seconde modalité. Dans ce sens, les participants déclaraient devoir choisir sur quelle modalité sensorielle se concentrer pendant l'apprentissage. Dans la majorité des cas, les

participants choisissaient de « faire abstraction » des informations motrices en se « laissant simplement guider ».

Enfin, et de manière étonnante, les distracteurs étaient rejetés de la même manière quelle que soit la modalité d'apprentissage, et plus rapidement que n'étaient reconnues les formes cibles. Si la reconnaissance des formes cibles semble être, à la lumière des résultats, une tâche difficile, rejeter les distracteurs pourrait être plus facile au regard de l'hypothèse de Lederman et Klatzky (1990). Ces auteurs proposent que les personnes se construisent des hypothèses sur les formes à partir des informations déjà stockées en mémoire et centreraient leur analyse perceptive sur une propriété précise afin de vérifier leurs hypothèses. Il serait ainsi plus facile d'éliminer avec certitude et rapidement une forme dès qu'un élément varie, comme l'orientation d'une boucle, que de valider sans doute aucun, la totalité d'un tracé. Dans ce sens, certains participants rapportaient « prêter uniquement attention aux lignes droites et boucles ».

Cette étude révèle que des adultes sont capables d'apprendre de nouvelles formes abstraites présentées de manière séquentielle, via la vision, le toucher et en utilisant conjointement ces deux modalités sensorielles. Cependant, après un délai de 48h, les résultats révèlent qu'il est plus facile de reconnaître visuellement les formes après un apprentissage unisensoriel visuel, qu'haptique ou qu'un apprentissage multisensoriel visuo-haptique. Nous ne mettons pas en évidence de bénéfice supplémentaire de l'ajout d'une exploration haptique de formes sur leur mémorisation. Toutefois, il semblerait que proposer une information séquentielle conjointement à plusieurs modalités sensorielles soit coûteux en attention et pourrait à ce titre perturber les processus d'intégration multisensorielle.

Discussion générale

Chapitre 9.

Discussion générale, perspectives et conclusions

Les recherches présentées dans cette thèse étaient destinées à préciser le rôle de la modalité haptique dans des entraînements de préparation à l'apprentissage de la lecture et de l'écriture. Le Tableau 16 résume les objectifs, méthodes et principaux résultats observés au cours des différentes études réalisées ainsi que leurs interprétations. Si la conscience phonémique et la connaissance des lettres sont reconnues comme prédictrices du niveau de lecture ultérieur et doivent être entraînées, une instruction explicite des correspondances entre les graphèmes et les phonèmes doit également être proposée au sein d'entraînement de préparation à la lecture (Hatcher, et al., 1994). Bien que ces entraînements soient efficaces pour mener la majorité des enfants à la compréhension et à l'utilisation du principe alphabétique, certains enfants ne parviennent pas ou difficilement à sa maîtrise. Ceci serait dû, en partie, à la difficulté d'associer les représentations orthographiques et phonologiques des lettres (Bryant & Bradley, 1985). Par ailleurs, nous avons vu que le mouvement contribuerait à la mise en place des représentations spatiales et que les connaissances motrices interviendraient dans l'organisation des perceptions visuelles chez les adultes et les enfants (chapitre 2.1.3). Les compétences motrices liées aux lettres influenceraient la perception de leurs formes (Flores d'Arcais, 1994; Freyd, 1983, 1987). C'est pendant l'apprentissage de l'écriture que l'enfant construit les représentations motrices correspondant aux représentations visuelles des lettres, elles-mêmes en cours de développement. L'apprentissage conjoint de la lecture et de l'écriture, la cooccurrence régulière des informations visuelles, auditives et haptiques, permettrait de lier les différentes représentations en une représentation multimodale des lettres. Renforcer précocement ces liens entre les compétences perceptives et les compétences motrices pourrait améliorer la mémorisation des lettres et ainsi favoriser la mise en place des correspondances grapho-phonémique chez les jeunes enfants. C'est ce que proposent les méthodes d'entraînements multisensoriels. Dans des recherches chez les enfants de grande section de maternelle, les chercheurs (Bara, et al., 2007; Bara, et al., 2004; Gentaz, et al., 2003) ont montré que l'ajout de la modalité haptique dans un entraînement de préparation à la lecture favorise le niveau de décodage des enfants. La séquentialité de l'exploration induite par la modalité haptique, qui obligerait l'enfant à traiter les lettres de manière plus séquentielle et donc plus analytique que lorsque les lettres sont présentées visuellement, pourrait expliquer ces effets bénéfiques.

Tableau 16. Résumé des questions posées, méthodes utilisées, principaux résultats obtenus aux différentes études réalisées ainsi que leurs conclusions et interprétations

Étude	Question posée	Méthode	Résultats principaux	Conclusions/Interprétations	
1	Les bénéfices des entraînements multisensoriels de préparation à la lecture en GSM sont-ils dus à la séquentialité de l'exploration des lettres, indépendamment de la modalité sensorielle sollicitée ou à l'exploration haptique <i>per se</i> ?	Comparaison d'une exploration de lettres visuelle séquentielle (VAM-bio), visuo-haptique séquentielle (HVAM) et visuelle simultanée (VAM). Mesure du niveau de décodage de pseudo-mots, des habiletés métaphonémiques et de la connaissance des lettres.	Une exploration visuo-haptique de lettres permettait une amélioration plus importante du niveau de décodage des enfants comparativement à une exploration visuelle simultanée ou séquentielle, les habiletés métaphonémiques et la connaissance des lettres étant égales par ailleurs.	L'exploration haptique <i>per se</i> des lettres serait à l'origine de l'efficacité de l'entraînement multisensoriel sur le niveau de décodage. La séquentialité de l'exploration indépendamment des modalités sensorielles n'apporte pas de bénéfice supplémentaire. L'exploration haptique ne permettrait pas une meilleure identification des lettres.	Chapitre 4
2	Étude des tâches d'évaluation de la connaissance du nom des lettres avant l'acquisition de la lecture : quel est l'intérêt des mesures de précision et d'automatisation ? Quels sont leurs liens avec les autres compétences de littératie et le niveau de décodage ?	Évaluation longitudinale (décembre-avril) des compétences de littératie d'enfants de GSM. Mesure du niveau de décodage de pseudo-mots, des habiletés métaphonémiques, de la connaissance du son et du nom des lettres (précision et rapidité de l'identification et de la dénomination de lettres).	Les scores de connaissance du nom des lettres sont corrélés aux scores d'habiletés métaphonémiques et de la connaissance du son des lettres en décembre et avril. Les enfants qui décodaient le plus de pseudo-mots étaient ceux qui possédaient la meilleure connaissance du nom des lettres, qui dénommaient précisément et rapidement les lettres.	La connaissance du nom des lettres pourrait influencer directement et indirectement le niveau de lecture, via l'amélioration des habiletés métaphonémiques et de la connaissance du son des lettres. La capacité de dénomination précise et rapide des lettres semble être l'élément le plus important et discriminant pour l'acquisition de la lecture.	Chapitre 5
3	L'ajout d'une exploration haptique de lettres dans un entraînement de préparation à l'écriture permet-il d'améliorer la fluidité des tracés ?	Comparaison d'un entraînement à l'écriture haptique (H) et contrôle (C). Mesure de paramètres de fluidité de l'écriture : vitesse moyenne, nombre de pics de vitesse et nombre de levers de crayons.	Une exploration haptique de lettres, via un dispositif à retour de force, permettait de davantage augmenter la vitesse moyenne de production, de diminuer le nombre de pics de vitesse et de levers de crayon comparativement à un entraînement classique à l'écriture.	Une exploration haptique de lettres améliore la fluidité de l'écriture. Le guidage haptique des mouvements aiderait le système moteur à intégrer les règles de base de la production motrice et conduirait les enfants à utiliser une stratégie proactive pour contrôler les mouvements d'écriture.	Chapitre 6
4	Une exploration haptique de formes abstraites permet-elle une meilleure mémorisation de nouvelles associations arbitraires entre des formes et des sons chez des adultes ? Ce bénéfice pourrait-il être dû à une meilleure mémorisation des formes ?	Comparaison d'une exploration multisensorielle (visuo-haptique) et visuelle de formes. Mesure de la reconnaissance des formes et des sons ainsi que des associations forme-son.	Une exploration multisensorielle de formes abstraites permettait aux adultes de mieux associer arbitrairement les formes aux sons dans une tâche de reconnaissance visuo-auditive par rapport à une exploration visuelle seule. Un nombre équivalent de formes abstraites étaient reconnues après les deux méthodes.	L'exploration visuo-haptique de formes abstraites ne permettrait pas une meilleure mémorisation des formes. La modalité haptique servirait de « ciment » entre les stimuli visuel et sonore.	Chapitre 7
5	Un apprentissage multisensoriel (visuo-haptique) de formes abstraites permet-il aux adultes d'apprendre rapidement de nouvelles formes et d'améliorer leur reconnaissance visuelle <i>a posteriori</i> ?	Comparaison d'un apprentissage visuo-haptique (VH), haptique (H) et visuel (V) de formes abstraites. Mesure du temps d'apprentissage, de la précision et de la rapidité de la reconnaissance visuelle des formes.	Le temps d'apprentissage des formes était plus important pour une exploration haptique seule que visuelle ou visuo-haptique. Après une exploration visuelle ou multisensorielle (tendance), les formes étaient mieux reconnues qu'après une exploration haptique seule. Le rejet des distracteurs était plus précis et plus rapide que la reconnaissance des formes apprises.	L'apprentissage multisensoriel de formes ne permet pas d'apprendre de nouvelles formes plus rapidement et n'apporte pas de bénéfice supplémentaire pour la reconnaissance visuelle des formes par rapport à un apprentissage unimodal visuel. Les mémoires visuelle et/ou motrice seraient toutefois suffisantes pour décider qu'une forme n'a pas été apprise.	Chapitre 8

9.1 Un traitement séquentiel des lettres facilite-t-il l'apprentissage de la lecture ?

La première question étudiée dans ce travail de thèse concernait le rôle de la séquentialité de l'exploration des lettres dans l'amélioration des performances en décodage. Nous avons ainsi comparé trois entraînements de préparation à la lecture auprès d'enfants de grande section de maternelle (11 enfants par groupe). Ces entraînements visaient à développer la conscience phonémique, la connaissance des lettres et des associations graphème-phonème. Ils se différençaient par la manière dont les lettres étaient explorées, visuellement et haptiquement dans l'entraînement HVAM (haptique-visuel-auditif-métaphonémique), visuellement et globalement dans l'entraînement VAM (visuel-auditif-métaphonémique), et visuellement à l'aide d'une présentation séquentielle respectant les caractéristiques biologiques du mouvement, dans l'entraînement VAM-biologique (visuel-auditif-métaphonémique-biologique). Les résultats montrent que le nombre de pseudo-mots décodés était plus important après l'entraînement HVAM qu'après les entraînements VAM et VAM-biologique (qui ne différaient pas). Ces résultats montrent que la perception visuelle séquentielle d'un mouvement naturel d'écriture ne permet pas d'expliquer les effets bénéfiques de l'ajout de la modalité haptique sur le décodage des enfants. Ceci suggère que la séquentialité de l'exploration, indépendamment des modalités sensorielles sollicitées, n'est pas à l'origine des effets observés sur le niveau de décodage des enfants.

9.1.1 Un traitement de l'information spatiale du « local vers le global » ne serait pas suffisant pour faciliter la perception des lettres

Il a été supposé qu'une exploration séquentielle des lettres, en favorisant un traitement analytique, permettrait d'obtenir davantage d'informations sur les différents éléments constitutifs des lettres et de mieux les apprendre. Lorsque les enfants n'avaient à leur disposition que la modalité visuelle ils pouvaient appréhender globalement et immédiatement de nombreux aspects des lettres (forme, orientation). Bien que nous proposons aux enfants, dans l'entraînement VAM, de suivre des yeux le tracé de la lettre et de se concentrer sur la forme, les lignes et les courbures de celle-ci, il leur était probablement difficile de décomposer la lettre en éléments organisés. Paquet (1999) montre que malgré la manipulation de facteurs attentionnels, il est très difficile de passer outre les informations de niveau global. D'autre part, afin de percevoir les propriétés spatiales des lettres via la modalité haptique, des

mouvements d'exploration étaient nécessaires. Les informations étaient donc recueillies séquentiellement, chaque nouvelle information devant être encodée, maintenue, et intégrée aux autres afin de parvenir à une représentation unifiée de la lettre. Alors que la caractéristique du traitement visuel serait plutôt de partir de l'information globale de forme pour aller vers l'information locale (e.g., orientation des traits, courbures, intersections), l'inverse serait observé pour le traitement haptique de l'information (« local vers le global ») (Berger & Hatwell, 1995). Ainsi, en proposant une exploration visuelle séquentielle (VAM-biologique), nous souhaitons moduler l'effet de précédenance de l'information globale de forme et rendre l'analyse visuelle de la lettre plus analytique. Toutefois, malgré une apparition progressive de la lettre à l'écran, nous n'avons pas les moyens de vérifier que les enfants effectuaient correctement la tâche. Il est possible que le toucher reste beaucoup plus séquentiel que la vision.

Dans l'étude 5, nous avons également proposé une exploration visuelle séquentielle des formes. Toutefois, nous avons contrôlé la quantité d'informations fournies par le déplacement d'un point blanc sur un fond noir le long des formes (qui ne laissait pas de trace). Ainsi, l'information visuelle était recueillie séquentiellement plutôt qu'en parallèle et de la même manière qu'avec la modalité haptique (même trajectoire et même vitesse de déplacement). Les modalités sensorielles pouvaient alors être comparées plus équitablement. Dans cette étude, conduite auprès d'un public adulte, l'ajout de la modalité haptique (condition multisensorielle) dans l'exploration de formes abstraites ne permettait pas non plus de mieux les mémoriser. Ainsi, dans l'étude 1, c'est l'exploration haptique des lettres qui serait responsable *per se* de l'effet obtenu sur le niveau de décodage des enfants, comme le suggéraient également Bara et ses collègues (2004).

9.2 Une exploration haptique des lettres permet-elle une meilleure connaissance des lettres ?

9.2.1 Est-ce une question attentionnelle ?

Une hypothèse concernant l'exploration haptique des lettres serait celle d'un effet attentionnel¹² favorisant leur traitement et leur mémorisation. Il est cependant très difficile

¹²Nous parlons essentiellement d'attention sélective, c'est-à-dire de la capacité de sélectionner des informations parmi d'autres.

d'apporter une réponse définitive à cette question. Il est en effet compliqué de mesurer précisément l'attention portée à la lettre qu'on demande de mémoriser au participant. Néanmoins, un des résultats obtenus par Hulme (1981) vient à l'encontre d'une explication uniquement attentionnelle de l'exploration haptique. Ce dernier, dans ses premières études chez des enfants âgés de 10 ans, proposait d'explorer visuellement ou visuo-haptiquement (suivre les contours des lettres à l'aide du doigt) des lettres en 3D (en plastique) ou en 2D (copie sur papier des lettres en plastique). Il montrait alors que le nombre de lettres correctement reconnues était plus important suite à une exploration visuelle et haptique, et ceci uniquement pour les lettres en 2D. Par conséquent, si l'effet de la modalité haptique était dû à une augmentation du niveau attentionnel alloué à l'exploration de la lettre, l'auteur aurait dû observer une différence de performance similaire pour les lettres 3D entre une exploration unisensorielle et multisensorielle.

9.2.2 Est-ce dû à une meilleure mémorisation des formes ?

Il a été proposé que l'utilisation de l'exploration haptique dans l'appréhension des lettres puisse engendrer une meilleure mémorisation et par voie de conséquence, une meilleure reconnaissance de la forme des lettres. En effet, forme et mouvements d'exploration sont intimement liés. Dans cette perspective, Hulme (1981) suggère que l'exploration haptique des lettres implique un double codage en mémoire moteur et visuel. Longcamp *et al.* (2005) ont montré que lorsque des enfants de 5 ans sont entraînés à tracer manuellement des lettres, leur mémorisation et par conséquent leur identification sont facilitées. D'autres expériences suggèrent également un rôle facilitateur de la trace motrice sur la reconnaissance visuelle des lettres chez les enfants (Naka, 1998) et les adultes (Naka & Noia, 1995). Ainsi, la mémorisation de la représentation visuelle des lettres serait facilitée lorsque des informations kinesthésiques sont ajoutées pendant la phase d'apprentissage.

Cependant, dans l'étude 1, les résultats obtenus à la tâche d'identification de lettres montrent une amélioration similaire du nombre moyen de lettres correctement identifiées par les enfants suite aux trois types d'entraînements (visuel, visuel séquentiel et visuo-haptique). Nous avons également proposé, dans deux nouvelles études menées chez des adultes (étude 4 et 5), d'évaluer les effets de l'ajout d'une exploration haptique de formes abstraites sur leur reconnaissance visuelle. Dans l'étude 4, l'exploration haptique de formes en relief était similaire à celle proposée chez les enfants. Dans l'étude 5, était proposée une exploration haptique de formes virtuelles guidée par un bras robot à retour de force. En comparant les

performances de reconnaissance visuelle des formes après l'apprentissage visuo-haptique (multisensoriel) par rapport à un apprentissage visuel (étude 4 et 5) et haptique (étude 5), nous n'avons pas mis en évidence de bénéfice supplémentaire de l'exploration haptique. Le double codage visuel et moteur, susceptible d'intervenir au cours de l'entraînement multisensoriel ne semble pas effectif. Nous avons cependant montré qu'un apprentissage des formes était obtenu avec une exploration unimodale haptique (étude 5).

9.2.2.1 Proposer une information globale de forme pourrait servir de guide à l'exploration haptique

Comme nous l'avons rappelé précédemment, dans l'étude 5, nous avons proposé un même mode d'exploration séquentielle des formes dans les deux modalités sensorielles (visuelle et haptique) afin de garantir l'accès à la même quantité d'informations et la même charge cognitive. La main du participant était guidée par un dispositif haptique et/ou il pouvait voir sur un écran d'ordinateur un point lumineux en mouvement parcourant la forme à apprendre. Il faut noter que le participant était privé de la vision directe de sa main. Alors que nous pensions éviter les phénomènes de capture visuelle (chapitre 1.2.3) chez des adultes experts dans le traitement visuel des stimuli, par une présentation visuelle séquentielle de l'information spatiale, il est possible que nous l'ayons encouragée. La présentation séquentielle de l'information, même redondante, pourrait être coûteuse en attention dans la situation multimodale (Spence & Driver, 1997). Ainsi, le traitement attentionnel fourni dans une modalité se répercuterait sur le traitement effectué par la seconde modalité. La plupart de nos participants déclaraient devoir faire un choix en se focalisant sur une des entrées sensorielles. La plupart ont rapporté à ce propos une préférence pour la modalité visuelle. Les processus d'attention endogène, c'est-à-dire l'orientation volontaire de l'attention vers une zone de l'espace dans l'attente d'une information (pour une revue voir Driver & Spence, 2004), pourrait influencer l'interaction entre les entrées sensorielles et la supposée intégration multisensorielle de l'information.

De plus, Lederman et Klatzky (1997) proposent une distinction entre deux types d'informations : l'information intensive, indiquant qu'une arête est présente quelque part sur une surface, et l'information spatiale qui spécifie la localisation et l'orientation de cette arête. Alors que l'information intensive sur les arêtes est rapidement disponible avec le toucher, l'information sur les caractéristiques spatiales est plus difficilement accessible. Quand la main est en contact avec un objet, elle ne dispose pas comme pour le système visuel d'un « champ périphérique » pouvant fournir des points d'ancrage à la perception. Néanmoins, Bara,

Fredembach, et Gentaz (2010) montrent, chez des enfants de 5-6 ans, que des lettres en relief sont mieux discriminées visuellement que des lettres en creux après une exploration haptique. Alors que l'utilisation de lettres en creux sollicite une procédure de suivi de contours, l'utilisation de lettres en relief impliquerait un traitement haptique similaire à celui mis en œuvre en vision, une première phase de perception globale (enveloppement) permettrait d'obtenir une information globale sur la forme et pourrait piloter les mouvements d'exploration suivants (suivi de contours), qui permettent le recueil d'informations locales plus précises sur la forme (Lederman & Klatzky, 1993).

Dans une étude sur la perception de formes abstraites chez les adultes, Walsh (1973) trouve qu'une présentation visuo-haptique ne différait pas d'une présentation visuelle lorsqu'il s'agissait de les reconnaître visuellement par la suite. Au contraire, la présentation multisensorielle des formes améliorerait sensiblement leur reconnaissance haptique. D'un autre côté, Wijntjes et ses collaborateurs (2008) montrent que lorsque des adultes ne sont pas capables d'identifier haptiquement un stimulus à partir d'une ligne en relief, ils le deviennent lorsqu'ils sont autorisés à représenter sur papier ce qu'ils ont ressenti durant l'exploration. L'information visuelle serait alors nécessaire pour faciliter l'identification des formes. Il est possible comme le suggérait Ikeda et Uchikawa (1978) que la description interne sérielle du stimulus pour être utilisée doive être transformée en une description simultanée plus facile à identifier.

Ainsi, fournir une information visuelle globale de la lettre pendant l'exploration haptique permettrait de faciliter la reconstruction globale de la forme tout en permettant au participant de se concentrer sur son geste. C'est dans cette condition particulière que la modalité haptique pourrait bénéficier à la mémorisation des formes.

9.2.2.2 Existe-t-il une reconnaissance plus rapide des stimuli?

Dans l'étude 1, comme dans l'étude 4, nous nous sommes demandé si la tâche d'identification des lettres utilisée était suffisamment sensible pour discriminer les enfants ou les adultes sur leur niveau de connaissance des lettres ou de formes abstraites. Plus précisément, nous cherchions à déterminer si elle ne constituait pas une mesure trop globale qui ne recouvrait pas toutes les dimensions de la connaissance des caractères (précision et rapidité). D'après Laberge et Samuels (1974), l'efficacité des processus de traitement pourrait être évaluée sur la base de deux critères : la précision et la rapidité qui permet d'en mesurer l'automatisme. Il est également important de noter qu'il existe une forte corrélation entre la précision et la vitesse de traitement des lettres et la fluidité de la lecture (Behrmann et al.,

1998 ; Laberge & Samuels, 1974). Une lecture fluide impliquerait en effet une précision et une automatisation des processus orthographiques et phonologiques sous-jacents.

L'objectif général de l'étude 2 était d'examiner différentes tâches d'évaluation de la connaissance du nom des lettres avant l'acquisition de la lecture chez 40 enfants scolarisés en grande section de maternelle. Pour ce faire, nous avons proposé des épreuves de dénomination (énoncer le nom des lettres présentées) et d'identification (indiquer parmi des lettres distrayantes la lettre entendue) des 26 lettres de l'alphabet. Pour chacune, nous avons recueilli un nombre de réponses correctes et un temps de réponse. Les résultats montrent que les enfants qui décodaient le plus de pseudo-mots étaient ceux qui possédaient la meilleure connaissance du nom des lettres, mais surtout qui dénommaient le plus précisément et rapidement les lettres.

Le recours à une tâche d'identification pourrait donc se révéler moins pertinent que celui à une tâche de dénomination. D'une part, la tâche d'identification pourrait être réussie sans que l'enfant ne possède une représentation de la lettre très précise en mémoire. Il pourrait utiliser une stratégie par élimination des lettres « impossibles » (déterminer que la lettre est un « a » parce que les trois autres lettres ne sont pas des « a »). D'autre part, pour réaliser cette tâche, d'autres facteurs, notamment l'exploration visuelle organisée et attentive du matériel, ou encore le fait de devoir pointer avec le doigt les lettres, influenceraient la mesure de rapidité. Ces résultats justifieraient sans doute l'utilisation d'un test d'identification de lettre en choix forcé (réponses « oui » ou « non ») suite à une question du type « est-ce un a » ? Néanmoins, la tâche d'identification telle que nous la proposons aurait un intérêt dans l'étude des erreurs d'identification, notamment celles impliquant les images en miroir des lettres.

9.2.3 Une exploration haptique des lettres permet-elle une mémorisation de leur orientation ?

Du fait de la particularité de l'exploration, dans le sens de l'écriture, il est possible que l'ajout de la modalité haptique bénéficie davantage à la mémorisation de l'orientation des lettres qu'à celle de leur forme globale. Il faut souligner que l'orientation des lettres est d'une importance cruciale pour leur identification, particulièrement pour les lettres scripts où l'orientation se révèle critique pour déterminer leur identité ; le lettre « d » n'est pas la lettre « b » ou la lettre « p ». De plus, il n'est pas rare d'observer chez les lecteurs débutants et les lecteurs en difficulté des confusions entre les caractères et leurs images en miroir (Cornell, 1985; Cubelli & Della Sala, 2009). Longcamp et ses collaborateurs (2005, 2006) ont obtenu

des données dans le sens de cette hypothèse. Ils ont proposé à des enfants de 5-6 ans et des adultes de tracer ou de frapper des caractères sur un clavier d'ordinateur (respectivement des lettres latines et de nouveaux caractères). Après avoir tracé les lettres, les enfants confondaient moins fréquemment les lettres apprises avec leur image en miroir et les adultes discriminaient mieux l'orientation des nouvelles formes apprises manuellement. Itakura et Imamizu (1994) montrent également, chez des enfants de 3 à 5 ans, que l'exploration haptique permettrait d'éviter les erreurs perceptives classiquement observées en vision, sur les images en miroir des lettres. Si visuellement, la différence entre une lettre et son image en miroir n'est pas immédiate (seule leur position relative par rapport à un axe vertical ou horizontal change), en revanche, sur le plan moteur, le programme élaboré pour une lettre ne correspond pas à celui de son image en miroir (direction des traits, sens de rotation). Dehaene et ses collaborateurs (Dehaene, 2007; Dehaene, et al., 2005; Dehaene et al., 2010) proposent que le système visuel a évolué pour « généraliser en miroir », c'est à dire pour ignorer les différences résultant des transformations en miroir des objets (chapitre 1.1.3) ou des scènes visuelles. Cette généralisation pourrait être utile au niveau comportemental pour les objets ou les visages mais serait problématique pour les lettres qui ne se conforment pas aux mêmes règles de symétrie. Il est alors supposé que cette invariance par symétrie doit être « désapprise » et que la difficulté de ce « désapprentissage » expliquerait les erreurs de lecture ainsi que leur persistance chez certains enfants dyslexiques. L'analyse *a posteriori* du type d'erreurs effectuées par les enfants dans notre tâche d'identification des lettres pourrait aller dans le sens d'une persistance des erreurs sur les images en miroir. Dans notre tâche, la lettre à identifier était représentée parmi trois autres lettres écrites en caractère cursif. Les lettres distrayantes étaient : une représentation en miroir de la lettre énoncée, une lettre graphiquement proche et une lettre graphiquement éloignée (étude 2). Nous pouvons noter qu'au cours des cinq mois de scolarisation des enfants, alors que le nombre moyen d'erreurs sur les lettres graphiquement proches (de 4.6 à 2) et éloignées (de 3.1 à 1.1) diminuaient significativement¹³, les erreurs sur les lettres en miroir (de 6.6 à 7.9), les plus nombreuses, augmentaient significativement¹⁴.

¹³ Respectivement, [$t_{(39)}=6.99$; $p<.001$] et [$t_{(39)}=4.4$; $p<.001$].

¹⁴ [$t_{(39)}=2.48$; $p<.05$].

Ainsi, l'ajout d'une information haptique permettrait de désambiguïser des situations dans lesquelles la vision se trouverait en difficulté pour identifier les lettres, comme au début d'un apprentissage.

9.3 Une exploration haptique des lettres joue-t-elle un rôle « ciment » entre les formes et les sons ?

Nous avons vu que la conscience phonologique et la connaissance des lettres sont considérées comme des prédicteurs de l'apprentissage de la lecture (chapitre 2.3). Dans notre étude 1, les enfants qui ont bénéficié d'un entraînement de préparation à la lecture, incluant ou non la modalité haptique, présentaient un niveau similaire de connaissance des lettres et de conscience phonémique à la fin de la grande section de maternelle. Cependant, les enfants qui exploraient haptiquement les lettres obtenaient de meilleures performances en décodage de pseudo-mots que ceux ayant suivi un entraînement visuel ou visuel séquentiel.

Dans l'étude 4, des adultes devaient apprendre 15 nouvelles associations arbitraires entre des formes et sons nouveaux, en utilisant deux méthodes d'apprentissage qui différaient quant à la modalité perceptive impliquée dans l'exploration des formes. Les adultes utilisaient la modalité visuelle dans l'apprentissage dit « classique », et les modalités visuelle et haptique dans l'apprentissage dit « multisensoriel », afin d'explorer les formes. Pendant les explorations, le son associé aux formes leur était présenté simultanément dans un casque. Immédiatement et une semaine après les entraînements, le niveau de connaissance des formes et des sons (tâches intramodales) ainsi que le niveau de connaissance des associations forme-son dans les deux sens de l'association (tâches intermodales) étaient évalués. Les résultats montrent que malgré un niveau de connaissance des formes et des sons équivalent après les deux méthodes d'entraînement, l'exploration haptique des formes bénéficiait aux associations « visuo-auditive » uniquement.

La première hypothèse explicative, relative au niveau de connaissance des lettres/formes, a été présentée dans la sous-partie précédente. Par ailleurs, Bryant et Bradley (1985) suggèrent que les enfants en difficulté de lecture et les apprentis-lecteurs auraient tendance à considérer les lettres et les sons comme deux entités séparées, ce qui rendrait difficile l'apprentissage de la lecture. La deuxième hypothèse suggère donc que l'exploration haptique de la lettre faciliterait l'établissement du lien entre les stimuli visuels et sonores (étude 1 et 4), et de ce fait améliorerait le niveau de décodage des enfants (étude 1). Nous

pouvons alors nous demander quel est le mécanisme à l'origine de ce « *liage* » (« *binding* ») perceptif ?

9.3.1 Existe-t-il une intégration multisensorielle de haut-niveau?

D'après Shams et Seitz (2008) (chapitre 1.2.3, Figure 11), pendant l'entraînement multisensoriel, lors de l'encodage, des entrées visuelles, auditives et tactiles étant présentes, une série plus importante de structures de traitement serait activée par rapport à l'entraînement classique (visuel et auditif). Ils proposent que des changements au sein des différentes représentations unimodales puissent avoir lieu du fait de la coactivation de ces différentes aires. En effet, il a été montré que des aires unimodales seraient impliquées dans l'intégration de signaux en provenance de plusieurs entrées sensorielles (voir par exemple, Calvert et al., 1997 pour une intégration audio-visuelle dans le cortex auditif ; Foxe et al., 2002 pour une intégration audio-tactile dans le cortex auditif ; Sathian & Lacey, 2007 pour une intégration visuo-haptique dans le cortex visuel). Il existerait notamment une activation de la partie dorsale du LOC¹⁵ (*LOTv*, pour aire *Occipito-Latérale Visuelle-Tactile*) pendant l'exploration visuelle et haptique d'objets en 3D (Amedi, Jacobson, Hendler, Malach, & Zohary, 2002; Amedi, Malach, Hendler, Peled, & Zohary, 2001; James et al., 2002) et de formes en 2D (Prather, Votaw, & Sathian, 2004; Schroeder, et al., 2001). Pour Amedi *et al.*, (2002) cette activation correspondrait à celle d'un substrat neural commun visuo-haptique sous-jacent à la représentation de l'objet. D'après nos résultats, nous pouvons penser que la représentation unimodale visuelle de la forme n'a pas été modifiée puisque nous n'observons pas de bénéfice de l'apprentissage multisensoriel sur sa reconnaissance.

Toujours d'après Shams et Seitz (2008), l'apprentissage multisensoriel pourrait provoquer une modification ou une formation de représentations multimodales. Dans ce sens, une convergence multisensorielle des informations auditives et visuelles au niveau du *Sillon Supra Temporal gauche* (STS) a été mise en évidence. Raij, Uutela et Hari (2000) montrent, par exemple, que l'activation du STS serait plus importante pour des stimuli audio-visuels sur-appris comme les phonèmes et les graphèmes. D'après les auteurs, ce résultat serait la preuve d'une réorganisation cérébrale suite à l'exposition fréquente à ce type de stimuli. De plus, une étude rapporte une activation du STS dans la perception tactile passive de lettres

¹⁵ Pour mémoire, le LOC (complexe latéral occipital) serait impliqué dans l'analyse visuelle de la forme globale des objets.

capitales associée à l'écoute d'un verbe contenant la lettre (Burton, McLaren, & Sinclair, 2006). Ces données suggèrent donc que le STS répondrait à des stimuli auditifs, visuels et haptiques (voir également M. Beauchamp, Yasar, Frye, & Ro, 2008; Beauchamp, Lee, Argall, & Martin, 2004). Enfin, dans l'intégration des informations visuelles et tactiles sur les objets, c'est *le sillon intrapariétal supérieur* (IPS) (Grefkes, Weiss, Zilles, & Fink, 2002) et *l'insula/claustum* (Hadjikhani & Roland, 1998) qui seraient le lieu de convergence. Il a été proposé que l'insula/claustum joue un rôle dans la communication entre les aires unimodales du fait de ses fortes connections avec les différentes aires sensorielles (Murray et al, 1998). Tandis que l'IPS serait le lieu de convergence multisensorielle pour les informations visuelles et tactiles concernant la forme des objets (Amedi, Kriegstein, Atteveldt, Beauchamp, & Naumer, 2005).

Dans notre étude, l'ajout de l'exploration haptique de nouvelles formes permettait aux adultes d'associer davantage de formes et de sons qu'une exploration visuelle seule. Il se pourrait donc que des représentations multisensorielles se soient développées suite aux deux apprentissages et qu'un plus large réseau d'aires cérébrales unisensorielles et multisensorielles soit sollicité suite à l'apprentissage multisensoriel (visuel, auditif et haptique) par rapport à l'apprentissage classique (visuel et auditif). Toutefois, une asymétrie apparaissait dans les performances du groupe multisensoriel. En effet, les participants reconnaissaient plus d'associations dans la tâche de reconnaissance visuo-auditive que dans la tâche audio-visuelle. Ce dernier résultat nous oblige à reconsidérer le modèle de Shams et Seitz (2008) en prenant en compte la nature des représentations multimodales. Lors de l'apprentissage classique impliquant deux modalités sensorielles, des représentations multisensorielles audio-visuelles pourraient se créer. Ainsi, quelle que soit l'entrée sensorielle (visuelle ou auditive) sollicitée pour retrouver le stimulus associé dans la seconde modalité, le même réseau d'aires cérébrales unisensorielles et multisensorielles serait recruté et les participants reconnaîtraient autant d'associations. Lors de l'apprentissage multisensoriel (visuel, auditif et haptique) et au vu des données obtenues dans les études en imagerie, nous pouvons supposer l'existence de plusieurs représentations multisensorielles. Deux représentations multisensorielles différentes pourraient se mettre en place : une représentation audio-visuelle et tactile et une représentation visuo-tactile. Ainsi, la présentation visuelle ultérieure d'une forme apprise activerait un plus large réseau d'aires cérébrales unisensorielles et multisensorielles par rapport à une présentation ultérieure du son appris. Nous pourrions tester cette « extension » du modèle en proposant de comparer les effets d'un nouvel entraînement aux deux entraînements déjà présentés. Il s'agirait de proposer un nouvel

entraînement multisensoriel (visuel auditif et moteur) mais au sein duquel nous proposerions d'associer des gestes aux sons (et non aux formes). Nous pourrions nous inspirer de la méthode Borel-Maisonnay¹⁶ (1962) où un geste est associé par son et non par graphie. Dans ce cas, suite à l'apprentissage, c'est la présentation auditive ultérieure du son appris qui devrait activer un plus large réseau d'aires cérébrales unisensorielles et multisensorielles par rapport à une présentation ultérieure de la forme. Une nouvelle forme d'asymétrie serait donc observée.

Enfin, malgré l'existence de nombreuses connections latérales entre les aires sensorielles unimodales (Falchier et al., 2002) qui suggère l'existence d'interactions ascendantes (Calvert & Thesen, 2004), et de diverses projections descendantes des aires multimodales vers les aires unimodales (Schroeder, et al., 2001 ; Falchier et al., 2002 ; Cappe & Barone, 2005), il est étonnant de ne pas observer d'amélioration du traitement visuel de la forme suite à un apprentissage multisensoriel. D'une part, il est probable que la durée de notre apprentissage (10 minutes) soit trop réduite pour permettre de profondes modifications de ce réseau. D'autre part, la tâche proposée consistait explicitement à apprendre de nouvelles associations lettre-son ; les participants en tant qu'experts dans ce type d'apprentissage (lecture) et dans le traitement visuel des formes pourraient accorder un plus grand poids aux informations visuelles et auditives qu'haptique pour accomplir la tâche (Ernst & Banks, 2002). Ainsi, au moment de la reconnaissance visuelle des formes, la modalité visuelle pourrait fournir à elle seule suffisamment d'informations spatiales fiables pour effectuer la tâche aussi précisément dans les deux groupes d'apprentissage.

9.4 Une exploration haptique de lettres permet-elle une amélioration des compétences motrices ?

L'étude 3 avait pour objectif d'évaluer les effets d'un entraînement incluant une exploration haptique de lettres cursives sur leur tracé. Malgré une absence d'effet sur la mémorisation des lettres (étude 1, 4 et 5), un des intérêts de l'entraînement haptique serait d'initier l'enfant au geste moteur nécessaire pour réaliser les lettres. En effet, les enfants effectuaient sous contrôle de l'expérimentateur, une exploration haptique des lettres dans le

¹⁶ A l'origine, la méthode Borel-Maisonnay est un ensemble de gestes ayant pour but de faciliter l'entrée dans le langage. Elle était dans un premier temps utilisée auprès d'enfants sourds avant d'être reprise pour l'enseignement classique.

sens de l'écriture (étude 1). Ainsi, un effet bénéfique de l'exploration haptique des lettres sur la qualité de leur tracé pourrait être observé.

Nous avons donc proposé à 42 enfants de grande section de maternelle, deux entraînements de préparation à l'écriture qui impliquaient un dispositif haptique (groupe visuo-haptique, VH) ou non (groupe contrôle, C). Les lettres cibles entraînées étaient les lettres cursives a, b, f, i, l et s. L'entraînement VH comprenait quatre exercices, deux communs avec l'entraînement contrôle (un exercice de coloriage d'une lettre et un puzzle de lettres composé de 4 pièces) et deux spécifiques avec le dispositif haptique. Ces derniers permettaient aux enfants de reproduire une lettre selon un standard qui n'était pas seulement statique (forme correcte, sens de production correct) mais aussi dynamique (règles de production motrice). L'entraînement contrôle comportait deux exercices spécifiques, un exercice de copie de lettres et de copie de phrases avec un clavier d'ordinateur. La fluidité de l'écriture était évaluée pour les six lettres cursives avant et après les deux interventions grâce à des paramètres cinématiques de production (vitesse moyenne, nombre de pics de vitesse, et nombre de levers de crayons). Les résultats montrent qu'après les sessions d'entraînement, les performances du groupe VH étaient meilleures que celles du groupe contrôle : la vitesse moyenne augmentait, les mouvements présentaient moins de pics de vitesse et les enfants levaient moins souvent le stylo pendant l'exécution.

9.4.1 Permet-elle d'améliorer la représentation motrice des lettres ?

Au début de l'apprentissage de l'écriture (chapitre 2.1.2), les programmes moteurs correspondants à chaque forme de lettres est en cours d'élaboration et le contrôle moteur est principalement rétroactif (basé sur les retours sensoriels). Les mouvements sont donc lents et guidés par les informations visuelles et kinesthésiques (Zesiger, 1995). Avec la pratique, l'écriture devient plus automatisée et le contrôle du mouvement devient peu à peu plus proactif (basé sur une représentation interne de l'acte moteur). L'ajout d'une exploration haptique guidée de la lettre, qui fournit des informations sur sa forme, son ordre de production et la cinématique de sa production (loi de puissance 2/3), faciliterait le déroulement de l'acte moteur puisque la fluidité de l'écriture des enfants était améliorée. Par conséquent, nous pensons que l'utilisation du dispositif haptique aiderait le système moteur à intégrer les règles de base de la production motrice et conduirait les enfants à utiliser une stratégie proactive pour contrôler les mouvements d'écriture. Plus précisément, la diminution du nombre de levers de crayon observée, qui reflète la diminution du nombre de traits nécessaires à la formation des lettres, pourrait témoigner d'une augmentation de la taille de l'unité du

programme moteur. Selon Zesiger (1995), l'acquisition de l'écriture se traduirait par l'augmentation de la taille des unités contenues dans le programme moteur (de segments de lettre, à la lettre entière). Après l'entraînement VH, le nombre de levers de crayons ayant diminué, les enfants produiraient au moins en un seul mouvement des portions importantes des lettres, à défaut de les produire entièrement.

Nous pouvons alors nous poser la question du transfert de compétence entre les lettres. Apprendre à tracer la lettre *l* cursive pourrait bénéficier au traçage des lettres cursives *b*, *h* ou *k*, qui commencent toutes par le même élément produit dans le même sens : la boucle ascendante. Même si la lettre n'est pas représentée entièrement dans le programme moteur, les segments déjà encodés pourraient bénéficier à la mise en place des programmes moteurs spécifiques d'autres lettres contenant ces mêmes segments. Des études complémentaires sont nécessaires pour examiner cette question du «transfert inter-lettres».

9.4.2 L'écriture de lettres influence-t-elle leur perception visuelle ?

Dans le cadre des interactions perceptivo-motrices, nous avons vu (chapitre 2.1.3) que les connaissances motrices interviendraient dans l'organisation des perceptions visuelles. Plus particulièrement, elles influenceraient la perception d'un stimulus en mouvement et la perception spatiale statique. D'après Freyd et ses collaborateurs (Babcock & Freyd, 1988; Freyd, 1983), les personnes seraient sensibles aux variations dans les tracés qui indiqueraient la manière dont les lettres ont été produites. Cette information pourrait être utilisée pour discriminer les lettres. Freyd (1987) présume également que des informations dynamiques, autres que l'ordre et la direction de production des lettres, pourraient participer à la perception visuelle des tracés statiques. Ainsi, les individus seraient capables de reconnaître facilement et rapidement des traces graphiques manuscrites notamment parce qu'ils sont capables de produire de tels tracés.

Nous pouvons nous demander si le bénéfice de l'exploration haptique, obtenu sur la dynamique du geste d'écriture pourrait également se traduire par une influence sur la perception visuelle des lettres. Toutefois, les programmes moteurs n'étant que partiellement en place au début de l'apprentissage, les interactions perception-action seraient minimales mais pourraient s'accroître avec la pratique. Ainsi, proposer précocement l'apprentissage conjoint de la lecture et de l'écriture pourrait favoriser ces interactions. Par ailleurs, comme nous l'avons abordé précédemment, le premier bénéfice d'une exploration haptique de lettres pourrait se manifester sur la discrimination de l'orientation visuelle des lettres plutôt que celle de leur forme globale.

9.5 Conclusion

La majorité des enfants normalement scolarisés apprend à lire et écrire avec succès au terme d'un apprentissage spécifique. Cependant, certains enfants ne parviennent pas ou difficilement à appréhender la logique du principe alphabétique et à l'utiliser. Des difficultés peuvent également être éprouvées dans l'écriture des lettres. Les méthodes d'entraînement multisensorielles proposent alors de renforcer les liens entre les compétences perceptives et les compétences motrices autour des lettres pour améliorer l'apprentissage de la lecture et de l'écriture.

Ce travail doctoral s'est intéressé au rôle de la modalité haptique dans des entraînements de préparation à l'apprentissage de la lecture et de l'écriture, plus particulièrement, à la manière dont l'exploration haptique de lettres bénéficierait au décodage des pseudo-mots et au tracé des lettres. Pour ce faire, nous avons comparé des entraînements multisensoriels, impliquant la modalité haptique et visuelle dans le travail d'exploration des lettres, à des entraînements unimodaux visuel ou haptique. Nous montrons qu'une exploration visuo-haptique de lettres permet une amélioration plus importante du niveau de décodage des enfants comparativement à une exploration visuelle simultanée ou séquentielle. Ainsi, nous pensons que la séquentialité de l'exploration, indépendamment des modalités sensorielles sollicitées, n'est pas à l'origine des effets observés sur le niveau de décodage des enfants. Un traitement des lettres supposé plus analytique ne serait pas suffisant ; la modalité haptique de part sa composante sensori-motrice serait l'élément crucial.

Par ailleurs, nous montrons que parmi les prédictors du niveau de lecture ultérieur, une connaissance précise et automatisée des lettres (dénomination) semble essentielle pour acquérir un bon niveau de décodage. Pour autant, l'ajout de l'exploration haptique dans l'appréhension des lettres ne semble pas engendrer leur meilleure mémorisation qui pourrait être à l'origine du bénéfice observé sur les capacités de décodage des enfants.

Nous montrons que l'apprentissage multisensoriel de formes nouvelles ne permet pas leur apprentissage plus rapide et n'apporte pas de bénéfice supplémentaire pour leur reconnaissance visuelle par rapport à un apprentissage unimodal visuel. Toutefois nous pensons que la question de la bonne évaluation de la connaissance des lettres est primordiale pour conclure définitivement sur ce point. Il est en effet possible que les premiers bénéfices d'une exploration haptique de lettres (relativement courte) se manifestent sur la discrimination de l'orientation visuelle des lettres plutôt que sur celle de leurs formes

globales. De plus, se pose la question de la meilleure manière de proposer l'information spatiale de forme à la modalité haptique : une information visuelle ou haptique concernant la forme globale du matériel à explorer pourrait être primordiale pour organiser l'exploration et la reconstruction du percept final.

Par ailleurs, suite à une exploration multisensorielle des formes, nous obtenons des résultats robustes concernant l'association entre de nouvelles formes et nouveaux sons. La modalité haptique pourrait donc servir de « ciment » entre les stimuli visuels et sonores. Le mécanisme exact de cet effet reste néanmoins à déterminer.

Enfin, nous avons pu noter que familiariser les enfants au geste d'écriture de lettres cursives, via une exploration haptique guidée, permet d'améliorer la fluidité de l'écriture. Ce résultat serait le témoin d'une intégration de certaines règles motrices de production des lettres (ordre de production, cinématique) et d'une possible augmentation de la taille de l'unité du programme moteur. Les enfants pourraient ainsi être amenés à utiliser une stratégie plus proactive pour contrôler leurs mouvements d'écriture. Ce dernier résultat serait particulièrement intéressant dans les problématiques de prévention ou de remédiation des difficultés et troubles de l'écriture. En effet, chez les enfants faibles scripteurs ou dysgraphiques, la formation des lettres peut être altérée (courbes supplémentaires, lettres ambiguës, corrections de lettres) et certaines de ces altérations laisseraient supposer un programme moteur de la lettre peu stable (Graham, Struck, Santoro, & Berninger, 2006), tout comme la présence d'un nombre important et particulièrement long de levers de crayon (Wann & Jones, 1986).

L'ensemble des résultats suggère une influence significative de l'exploration haptique de lettres dans l'apprentissage de la lecture et de l'écriture et encourage donc sa prise en compte dans des méthodes de préparation aux apprentissages scolaires et de remédiation.

Références

- Abravanel, E. (1968). The development of intersensory patterning with regard to selected spatial dimensions. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 33, Whole N°118.
- Adams, M. J. (1979). Models of word recognition. *Cognitive Psychology*, 11, 133-167.
- Aghababian, V., & Nazir, T. A. (2000). Developing normal reading skills: aspects of the visual processes underlying word recognition. *Journal of Experimental Child Psychology*, 76, 123-150.
- Alais, D., & Burr, D. (2003). The "flash-lag" effect occurs in audition and crossmodally. *Current Biology*, 13, 59-63.
- Allen, P. A., & Emerson, P. L. (1991). Holism Revisited: Evidence for Parallel Independent Word-Level and Letter-Level Processors During Word Recognition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 17(2), 489-511.
- Amedi, A., Jacobson, G., Hendler, T., Malach, R., & Zohary, E. (2002). Convergence of visual and tactile shape processing in the human lateral occipital complex. *Cerebral Cortex*, 12, 1202-1212.
- Amedi, A., Kriegstein, K., Atteveldt, N., Beauchamp, M., & Naumer, M. (2005). Functional imaging of human crossmodal identification and object recognition. *Experimental Brain Research*, 166(3), 559-571. doi: 10.1007/s00221-005-2396-5
- Amedi, A., Malach, R., Hendler, T., Peled, S., & Zohary, E. (2001). Visuohaptic object-related activation in the ventral visual pathway. *Nature Neuroscience*, 4, 324-330.
- Anderson, S. W., Damasio, A. R., & Damasio, H. (1990). Troubled letters but not numbers: Domain specific cognitive impairments following focal damage in frontal cortex. *Brain*, 113, 749-766.
- Anthony, J. L., Lonigan, C. J., Burgess, S. R., Driscoll, K., Phillips, B. M., & Cantor, B. J. (2002). Structure of Preschool Phonological Sensitivity: Overlapping Sensitivity to Rhyme, Words, Syllables, and Phonemes. *Journal of Experimental Child Psychology*, 82, 65-92.
- Arguin, M., & Bub, D. N. (1993). Single-character processing in a case of pure alexia. *Neuropsychologia*, 31(5), 435-458.
- Arguin, M., & Bub, D. N. (1995). Priming and response selection processes in letter classification and identification tasks. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(5), 1199-1219.
- Atkins, J. E., Fiser, J., & Jacobs, R. A. (2001). Experience-dependent visual cue integration based on consistencies between visual and haptic percepts. *Vision Research*, 41(4), 449-461.
- Babcock, M. K., & Freyd, J. J. (1988). Perception of Dynamic Information in Static Handwritten Forms. *The American Journal of Psychology*, 101(1), 111-130.
- Baird, P. J., & Laszlo, J. I. (1981). Kinaesthetic Sensitivity to Passive Movements and its Relationship to Motor Development and Motor Control. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 23(6), 606 - 616.
- Bara, F. (2005). *Influence de la modalité haptique manuelle dans l'apprentissage de la lecture et de l'écriture*. Université de Savoie, Chambéry.
- Bara, F., Fredembach, B., & Gentaz, E. (2010). Rôle des procédures exploratoires manuelles dans la perception haptique et visuelle de formes chez des enfants scolarisés en cycle 2. *L'Année Psychologique*, 110(2), 197-225.

- Bara, F., Gentaz, E., & Colé, P. (2007). The visuo-haptic and haptic exploration increases the decoding level of children coming from low-socioeconomic status families. *British Journal of Developmental Psychology*, 25, 643-663.
- Bara, F., Gentaz, E., Colé, P., & Sprenger-Charolles, L. (2004). The visuo-haptic and haptic exploration of letters increases the kindergarten-children's reading acquisition. *Cognitive Development*, 19, 433-449.
- Bartolomeo, P., Bachoud-Lévi, A.-C., Chokron, S., & Degos, J.-D. (2002). Visually- and motor-based knowledge of letters: Evidence from a pure alexic patient. *Neuropsychologia*, 40, 1363-1371.
- Bear, M. F., Connors, B. W., & Paradiso, M. A. (2001). *Neurosciences à la découverte du cerveau*: Pradel.
- Beauchamp, M., Yasar, N. E., Frye, R. E., & Ro, T. (2008). Touch, sound and vision in human superior temporal sulcus. *Neuroimage*, 41(3), 1011-1020.
- Beauchamp, M. S., Lee, K. E., Argall, B. D., & Martin, A. (2004). Integration of auditory and visual information about objects in superior temporal sulcus. *Neuron*, 41, 809-823.
- Beech, J. R., Pedley, H., & Barlow, R. (1994). Training letter-to-sound connections: The efficacy of tracing. *Current Psychology*, 13(2), 153-164.
- Behrmann, M., Plaut, D. C., & Nelson, J. (1998). A literature review and new data supporting an interactive account of letter by letter reading. *Cognitive Neuropsychology*, 15(1/2), 7-51.
- Berger, C., & Hatwell, Y. (1995). Development of analytic vs global processing in haptics: the perceptual and decisional determinants of classification skills. *British Journal of Developmental Psychology*, 13, 143-162.
- Berkeley, G. (1910). *Essay towards a new theory of vision*. London: Dutton.
- Berninger, V. W., & Rutberg, J. (1992). Relationship of finger function to beginning writing: Application to diagnosis of writing disabilities. *Developmental Medicine Child Neurology*, 34, 198-215.
- Berninger, V. W., Vaughan, K. B., Abbott, R. D., Abbott, S. P., Rogan, L. W., Brooks, A., . . . Graham, S. (1997). Treatment of Handwriting Problems in Beginning Writers: Transfer From Handwriting to Composition. *Journal of Educational Psychology*, 89(4), 652-666.
- Bertelson, P., & Radeau, M. (1981). Cross-modal bias and perceptual fusion with auditory-visual spatial discordance. *Perception and Psychophysics*, 29(6), 578-584.
- Biederman, I. (1987). Recognition-by-Components: A Theory of Human Image Understanding. *Psychological Review*, 94(2), 115-147.
- Biederman, I., & Gerhardstein, P. C. (1993). Recognizing depth-rotated objects: Evidence and conditions for three-dimensional viewpoint invariance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19(6), 1162-1182.
- Bigelow, A. E. (1981). Children's Tactile Identification of Miniaturized Common Objects. *Developmental Psychology*, 17(1), 111-114.
- Blachman, B. A., Ball, E. W., Black, R. S., & Tangel, D. M. (1994). Kindergarten teachers develop phonemic awareness in low-income inner-city classrooms ; Does it makes a difference? . *Reading and Writing : An Interdisciplinary Journal*, 6, 1-18.
- Bluteau, J., Coquillart, S., Payan, Y., & Gentaz, E. (2008). Haptic Guidance Improves the Visuo-Manual Tracking of Trajectories. *PLoS ONE*, 3(3), e1775.
- Bonnefoy, B., & Rey, A. (2008). Automatisation de la connaissance des lettres chez l'apprenti lecteur. *L'Année Psychologique*, 108, 187-206.

- Borel-Maisonny, S. (1962). *Langage oral et écrit. Pédagogie des notions de base. tome 1*. Neuchâtel: Delachaux et Niestlé.
- Bourdin, B., & Fayol, M. (1994). Is Written Language Production more Difficult than Oral Language Production? A Working Memory Approach. *International Journal of Psychology*, 29(5), 591 - 620.
- Bourdin, B., & Fayol, M. (1996). Mode effects in a sentence production span task. *Cahiers de Psychologie Cognitive/Current Psychology of Cognition*, 15(3), 245-264.
- Bourdin, B., & Fayol, M. (2002). Even in adults, written production is still more costly than oral production. *International Journal of Psychology*, 37, 219-222.
- Bowers, J. S., Vigliocco, G., & Haan, R. (1998). Orthographic, phonological, and articulatory contributions to masked letter and word priming. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24(6), 1705-1719.
- Bowers, P. G., & Swanson, L. B. (1991). Naming speed deficits in reading disability: Multiple measures of a singular process. *Journal of Experimental Child Psychology*, 51, 195-219.
- Bradley, L., & Bryant, P. E. (1991). Phonological skills before and after learning to read. In S. A. Brady & D. P. Shankweiler (Eds.), *Phonological processes in literacy: A tribute to Isabelle Y. Liberman* (pp. 37-45): Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Bresciani, J.-P., Dammeier, F., & Ernst, M. O. (2006). Vision and touch are automatically integrated for the perception of sequences of events. *Journal of Vision*, 6(5), 554-564.
- Bryant, P., & Bradley, L. (1985). *Children's reading problems : psychology and education*. Oxford: Blackwell.
- Bullier, J. (1998). Architecture fonctionnelle du système visuel. In M. Boucart, M. A. Hénaff & C. Belin (Eds.), *Vision : aspects perceptifs et cognitifs* (pp. 11-42). Cahors: SOLAL.
- Burgund, E. D., Schlaggar, B. L., & Petersen, S. E. (2006). Development of letter-specific processing: The effect of reading ability. *Acta Psychologica*, 122, 99-108.
- Burton, A. W., & Dancisak, M. J. (2000). Grip form and graphomotor control in preschool children. *The American Journal of Occupational Therapy*, 54(1), 9-17.
- Burton, H., McLaren, D. G., & Sinclair, R. J. (2006). Reading embossed capital letters: an fMRI study in blind and sighted individuals. *Human Brain Mapping*, 27, 325-339.
- Bus, A. G., & Van Ijzendoorn, M. H. (1999). Phonological awareness and early reading : A meta-analysis of experimental training studies. *Journal of Educational Psychology*, 91, 403-414.
- Byrne, B., & Fielding-Barnsley, R. (1989). Phonemic awareness and letter knowledge in child's acquisition of the alphabetic principle. *Journal of Educational Psychology*, 81, 313-321.
- Byrne, B., & Fielding-Barnsley, R. (1990). Acquiring the alphabetic principle: a case of teaching recognition of phoneme identity. *Journal of Educational Psychology*, 82, 805-812.
- Byrne, B., & Fielding-Barnsley, R. (1991). Evaluation of a program to teach phonemic awareness to young children. *Journal of Educational Psychology*, 83, 451-455.
- Byrne, B., & Fielding-Barnsley, R. (1993). Evaluation of a program to teach phonemic awareness to young children : A 1-year follow-up. *Journal of Educational Psychology*, 85, 104-111.
- Byrne, B., & Fielding-Barnsley, R. (1995). Evaluation of a program to teach phonemic awareness to young children: A 2- and 3-year follow-up and a new preschool trial. *Journal of Educational Psychology*, 87(3), 488-503.

- Byrne, B., Fielding-Barnsley, R., & Ashley, L. (2000). Effects of preschool phoneme identity training after six years : Outcome level distinguished from rate of response. *Journal of Educational Psychology*, 92(4), 659-667.
- Calvert, G. A. (2001). Crossmodal processing in the human brain: insights from functional neuroimaging studies. *Cerebral Cortex*, 11, 1110-1123.
- Calvert, G. A., Bullmore, E. T., Brammer, M. J., Campbell, R., Williams, S. C., McGuire, P. K., . . . David, A. S. (1997). Activation of auditory cortex during silent lipreading. *Science*, 276, 593-596.
- Calvert, G. A., & Thesen, T. (2004). Multisensory integration: methodological approaches and emerging principles in the human brain. *Journal of Physiology - Paris* 98, 191-205.
- Cappe, C., & Barone, P. (2005). Heteromodal connections supporting multisensory integration at low levels of cortical processing in the monkey. *European Journal of Neuroscience*, 22, 2886-2902.
- Carroll, J. M. (2004). Letter knowledge precipitates phoneme segmentation, but not phoneme invariance. *Journal of Research in Reading*, 27(3), 212-225.
- Carroll, J. M., Snowling, M., Hulme, C., & Stevenson, J. (2003). The development of phonological awareness in preschool children. *Developmental Psychology*, 39, 913-923.
- Casalis, S., & Louis-Alexandre, M. (2000). Morphological analysis, phonological analysis and learning to read French : a longitudinal study. *Reading and Writing : An Interdisciplinary Journal*, 12, 303-335.
- Castles, A., & Coltheart, M. (2004). Is there a causal link from phonological awareness to success in learning to read? *Cognition*, 91, 77-111.
- Cave, K. R., & Kosslyn, S. M. (1989). Varieties of Size-Specific Visual Selection. *Journal of Experimental Psychology*, 118(2), 148-164.
- Chartrel, E., & Vinter, A. (2006). Rôle des informations visuelles dans la production de lettres cursives chez l'enfant et l'adulte. *L'année psychologique*, 106, 43-64.
- Cohen, L., Dehaene, S., Naccache, L., Lehericy, S., Dehaene-Lambertz, G., Henaff, M. A., & Michel, F. (2000). The visual word form area: spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients. *Brain*, 123, 291-307.
- Cohen, L., Lehericy, S., Chochon, F., Lemer, C., Rivaud, S., & Dehaene, S. (2002). Language-specific tuning of visual cortex? Functional properties of the Visual Word Form Area. *Brain*, 125, 1054-1069.
- Colé, P., & Sprenger-Charolles, L. (1999). Traitement syllabique au cours de la reconnaissance de mots écrits chez des dyslexiques, lecteurs en retard et normo-lecteurs de 11 ans de différents niveaux d'expertise en lecture. *Revue de Neuropsychologie*, 2-3, 323-361.
- Coltheart, M., Curtis, B., Atkins, P., & Haller, M. (1993). Models of Reading Aloud: Dual-Route and Parallel-Distributed-Processing Approaches. *Psychological Review*, 100(4), 589-608.
- Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R., & Ziegler, J. C. (2001). DRC : a dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review*, 108(1), 204-256.
- Congedo, M., Lecuyer, A., & Gentaz, E. (2006). The Influence of Spatial De-location on Perceptual Integration of Vision and Touch. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 15, 353-357.
- Cormier, P. (2006). Connaissance du nom des lettres chez des enfants francophones de 4, 5 et 6 ans au Nouveau-Brunswick. *Education et Francophonie*, 34, 5-27.
- Cornelissen, P. L., Tarkiainen, A., Helenius, P., & Salmelin, R. (2003). Cortical effects of shifting letter position in letter strings of varying length. *Journal of cognitive neuroscience*, 15, 731-746.

- Cornell, J. M. (1985). Spontaneous mirror-writing children. *Canadian journal of psychology*, 39(1), 174-179.
- Cornhill, H., & Case-Smith, J. (1996). Factors that relate to good and poor handwriting. *The American Journal of Occupational Therapy*, 50(9), 732-739.
- Cubelli, R., & Della Sala, S. (2009). Mirror writing in pre-school children: a pilot study. *Cognitive Processing*, 10(2), 101-104.
- D'Angiulli, A., Kennedy, J. M., & Heller, M. A. (1998). Blind children recognizing tactile pictures respond like sighted children given guidance in exploration. *Scandinavian Journal of Psychology*, 39(3), 187-190.
- Daly, C. J., Kelley, G. T., & Krauss, A. (2003). Relationship between visual-motor integration and handwriting skills of children in kindergarten : a modified replication study. *The American Journal of Occupational Therapy*, 57, 459-462.
- De'Sperati, C., & Viviani, P. (1997). The relationship between curvature and velocity in two-dimensional smooth pursuit eye movements. *The Journal of Neuroscience*, 17(10), 3932-3945.
- De Abreu, M. D., & Cardoso-martins, C. (1998). Alphabetic access route in beginning reading acquisition in Portuguese: The role of letter-name knowledge. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal*, 10, 85-104.
- De Vignemont, F., Ehrsson, H. H., & Haggard, P. (2005). Bodily Illusions Modulate Tactile Perception. *Current Biology*, 15, 1286-1290.
- Dehaene, S. (2007). *Les neurones de la lecture*. Paris: Odile Jacob.
- Dehaene, S., Cohen, L., Sigman, M., & Vinckier, F. (2005). The neural code for written words: a proposal. *Trends in cognitive sciences*, 9, 335-341.
- Dehaene, S., Nakamura, K., Jobert, A., Kuroki, C., Ogawa, S., & Cohen, L. (2010). Why do children make mirror errors in reading? Neural correlates of mirror invariance in the visual word form area. *Neuroimage*, 49(2), 1837-1848.
- Denckla, M. B., & Rudel, R. G. (1974). Rapid "automatized" naming of pictured objects, colors, letters, and numbers by normal children. *Cortex*, 10, 186-202.
- Dennis, J. L., & Swinith, Y. (2001). Pencil grasp and children's handwriting legibility during different-length writing tasks. *The American Journal of Occupational Therapy*, 55(2), 175-183.
- Diependaele, K., Ziegler, J. C., & Grainger, J. (2010). Fast phonology and the Bimodal Interactive Activation Model. *European Journal of Cognitive Psychology*, 22(5), 764 - 778.
- Dijkerman, H. C., & de Haan, E. H. (2007). Somatosensory processing subserving perception and action: Dissociations, interactions, and integration. *Behavioral and Brain Sciences*, 30(02), 224-230.
- Drewnowski, A., & Healy, A. F. (1977). Detection errors on *the* and *and*: Evidence for reading units larger than the word. *Memory & Cognition*, 5, 636-647.
- Dunn, L. M., & Theriault Whalen, C. M. (1988). *Echelle de vocabulaire en images (EVIP-Peabody)*. Paris: France.
- Ecalles, J. (2004). Les connaissances des lettres et l'écriture du prénom chez l'enfant français avant l'enseignement formel de la lecture-écriture. *Psychologie Canadienne*, 45(1), 111-118.
- Ecalles, J., Magnan, A., & Biot-Chevrier, C. (2008). Alphabet knowledge and early literacy skills in French beginning readers. *European Journal of Developmental Psychology*, 5(3), 303-325.
- Edelman, S., & Bulthoff, H. H. (1992). Orientation dependence in the recognition of familiar and novel views of three-dimensional objects. *Vision Research*, 32, 2385-2400.

- Ehri, L. C. (1995). Phases of development in learning to read words by sight. *Journal of Research in Reading*, 18, 116-125.
- Ehri, L. C., Nunes, S. R., Stahl, S. A., & Willows, D. M. (2001). Systematic phonics instruction helps students learn to read : Evidence from the National Reading Panel's meta-analysis. *Reading Research Quarterly*, 36, 250-287.
- Ehri, L. C., & Wilce, L. S. (1985). Movement into reading: Is the first stage of printed word reading visual or phonetic? *Reading Research Quarterly*, 20, 163-179.
- Ernst, M. O. (2007). Learning to integrate arbitrary signals from vision and touch. *Journal of Vision*, 7(5), 1-14.
- Ernst, M. O., & Banks, M. S. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, 415(6870), 429-433.
- Evans, M. A., Bell, M., Shaw, D., Moretti, M., & Page, J. (2006). Letter names, letter sounds and phonological awareness: an examination of kindergarten children across letters and of letters across children. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal* 19(9), 959-989.
- Falchier, A., Clavagnier, S., Barone, P., & Kennedy, H. (2002). Anatomical evidence of multimodal integration in primate striate cortex. *Journal of Neuroscience*, 22, 5749-5759.
- Fernald, G. M. (1943/1988). *Remedial techniques in basic school subjects*. Austin, TX: Pro-Ed.
- Fernald, G. M., & Keller, H. (1921). The effect of kinaesthetic factors in the development of word recognition in the case of non-readers. *The Journal of Educational Research*, 4(5), 355-377.
- Feygin, D., Keehner, M., & Tendick, R. (2002). Haptic guidance: experimental evaluation of a haptic training method for a perceptual motor skill. *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, 40-47.
- Finks, R. A., Pinker, S., & Farah, M. J. (1989). Reinterpreting visual patterns in mental imagery. *Cognitive Science*, 13(1), 51-78.
- Fiset, D., Blais, C., Arguin, M., Tadros, K., Éthier-Majcher, C., Bub, D. N., & Gosselin, F. (2009). The spatio-temporal dynamics of visual letter recognition. *Cognitive Neuropsychology*, 26(1), 23-35.
- Fiset, D., Blais, C., Éthier-Majcher, C., Arguin, M., Bub, D. N., & Gosselin, F. (2008). Features for uppercase and lowercase letter identification. *Psychological Science*, 19, 1160-1167.
- Flores d'Arcais, G. B. (1994). Order of strokes writing as a cue for retrieval in reading Chinese characters. *European Journal of Cognitive Psychology*, 6, 337-355.
- Forster, B., Cavina-Pratesi, C., Aglioti, S. M., & Berlucchi, G. (2002). Redundant target effect and intersensory facilitation from visual-tactile interactions in simple reaction time. *Experimental Brain Research*, 143, 480-487.
- Foulin, J.-N. (2007). La connaissance des lettres chez les prélecteurs : aspects pronostiques, fonctionnels et diagnostiques. *Psychologie Française*, 52(4), 431-444.
- Foxe, J. J., Wylie, G. R., Martinez, A., Schroeder, C. E., Javitt, D. C., Guilfoyle, D., . . . Murray, M. M. (2002). Auditory-somatosensory multisensory processing in auditory association cortex: An fMRI study. 88(1), 540-543
- Freyd, J. J. (1983). Representing the dynamics of a static form. *Memory & Cognition*, 11, 342-346.
- Freyd, J. J. (1987). Dynamic mental representations. *Psychological Review*, 94(4), 427-438.

- Frith, U. (1985). Beneath the surface of developmental dyslexia. In K. Patterson, J. Marshall & M. Coltheart (Eds.), *Surface Dyslexia, Neuropsychological and Cognitive Studies of Phonological Reading* (pp. 301-330). London: Erlbaum.
- Gentaz, E., Colé, P., & Bara, F. (2003). Evaluation d'entraînements multisensoriels de préparation à la lecture chez les jeunes enfants de grande section maternelle: étude sur la contribution du système haptique manuel. *L'Année Psychologique*, 104, 561-584.
- Gervais, M. J., Harvey, L. O., & Roberts, J. O. (1984). Identification confusions among letters of the alphabet. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 10(5), 655-666.
- Giard, M. H., & Peronnet, F. (1999). Auditory-visual integration during multimodal object recognition in humans: a behavioral and electrophysiological study. *Journal of cognitive neuroscience*, 11, 473-490.
- Gibson, E. J. (1969). *Principles of Perceptual Learning and Development*. New York: Appleton-Century-Croft.
- Gibson, E. J. (1971). Perceptual Learning and the Theory of Word Perception. *Cognitive Psychology*, 2, 351-358.
- Gibson, J. J. (1962). Observations on active touch. *Psychological Review*, 69(6), 477-491.
- Goodale, M. A., Milner, A. D., Jakobson, L. S., & Carey, D. P. (1991). A neurological dissociation between perceiving objects and grasping them. *Nature* 349, 154-156.
- Goodnow, J. J., & Levine, R. A. (1973). "The grammar of action" : Sequence and syntax in children's copying. *Cognitive Psychology*, 4, 82-98.
- Goswami, U. (1993). Toward an Interactive Analogy Model of Reading Development: Decoding Vowel Graphemes in Beginning Reading. *Journal of Experimental Child Psychology*, 56(3), 443-475.
- Graham, S., Berninger, V. W., Abbott, R. D., Abbott, S. P., & Whitaker, D. (1997). Role of mechanics in composing of elementary school students : A new methodological approach. *Journal of Educational Psychology*, 89, 170-182.
- Graham, S., Berninger, V. W., & Weintraub, N. (2001). Which manuscript letters do primary grade children write legibly? . *Journal of Educational Psychology*, 93, 488-497.
- Graham, S., Struck, M., Santoro, J., & Berninger, V. W. (2006). Dimensions of good and poor handwriting legibility in first and second graders: Motor programs, visual-spatial arrangement, and letter formation parameter setting. *Developmental neuropsychology*, 29, 43-60.
- Grefkes, C., Weiss, P. H., Zilles, K., & Fink, G. R. (2002). Crossmodal processing of object features in human anterior intraparietal cortex: an fMRI study implies equivalencies between humans and monkeys. *Neuron*, 35, 173-184.
- Grill-Spector, K., Kourtzi, Z., & Kanwisher, N. (2001). The lateral occipital complex and its role in object recognition. *Vision Research*, 41, 1409-1422.
- Grill-Spector, K., Kushnir, T., Edelman, S., Avidan, G., Itzhak, Y., & Malach, R. (1999). Differential processing of objects under various viewing conditions in the human lateral occipital complex. *Neuron*, 24, 187-203.
- Grill-Spector, K., Kushnir, T., Hendler, T., & Malach, R. (2000). The dynamics of object-selective activation correlate with recognition performance in humans. *Nature Neuroscience*, 3(8), 837-843.
- Guest, S., & Spence, C. (2003). What role does multisensory integration play in the visuotactile perception of texture. *International Journal of Psychophysiology*, 50, 63-80.

- Hadjikhani, N., & Roland, P. E. (1998). Cross-modal transfer of information between the tactile and the visual representations in the human brain: a positron emission tomographic study. *Journal of Neuroscience*, 18, 1072-1084.
- Halata, Z., & Baumann, K. I. (2008). Anatomy of receptors. In M. Grunwald (Ed.), *Human Haptic Perception: Basics and Applications* (pp. 85-92): Birkhäuser Basel.
- Harm, M. W., & Seidenberg, M. S. (1999). Phonology, Reading Acquisition, and Dyslexia: Insights From Connectionist Models. *Psychological Review*, 106(3), 491-528.
- Hatcher, J., Hulme, C., & Ellis, A. W. (1994). Ameliorating early reading failure by integrating the teaching of reading and phonological skills : The phonological linkage hypothesis. *Child Development*, 65, 41-57.
- Hatwell, Y. (1994). Transferts intermodaux et intégration intermodale. In M. Richelle, J. Requin & M. Robert (Eds.), *Traité de Psychologie Expérimentale* (pp. 543-584). Paris: Presses Universitaires de France.
- Hatwell, Y. (2000a). Les coordinations intermodales chez l'enfant et l'adulte. In Y. Hatwell, A. Streri & E. Gentaz (Eds.), *Toucher pour connaître. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle* (pp. 156-165). Paris: Presses Universitaires de France.
- Hatwell, Y. (2000b). *Toucher pour connaître. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle*. Paris: Presses Universitaires de France.
- Hatwell, Y. (2003). *Psychologie cognitive de la cécité précoce*. Paris: Dunod.
- Hatwell, Y., & Gentaz, E. (2008). Early psychological studies of touch in France. In M. Grunwald (Ed.), *Human Haptic Perception - Basics and Applications*. Berlin, Basel, Boston: Birkhäuser.
- Hatwell, Y., Osiek, C., & Jeanneret, V. (1973). L'exploration perceptive tactile d'un ensemble discret d'objets chez l'enfant et l'adulte. *L'Année Psychologique*, 73, 419-441.
- Healy, A. F. (1994). Letter detection: A window to unitization and other cognitive processes in reading text. *Psychonomic Bulletin & Review*, 1(3), 333-344.
- Heller, M. A. (1984). Active and passive touch: the influence of exploration time on form recognition. *The Journal of general psychology*, 110(2), 243-249.
- Heller, M. A. (1989). Picture and pattern perception in the sighted and the blind: the advantage of the late blind. *Perception*, 18(3), 379-389.
- Heller, M. A., & Kennedy, J. M. (1990). Perspective taking, pictures, and the blind. *Perception & Psychophysics*, 48(5), 459-466.
- Heller, M. A., Kennedy, J. M., & Joyne, T. D. (1995). Production and interpretation of pictures of houses by blind people. *Perception*, 24, 1049-1058.
- Heller, M. A., & Myers, D. (1983). Active and passive tactual recognition of form. *Journal of General Psychology*, 108, 225-229.
- Hennion, B., Gentaz, E., Gouagout, P., & Bara, F. (2005). Telemaque, a new visuo-haptic interface for remediation of dysgraphic children. *Proceedings of WorldHaptic*, 410-419.
- Heuer, H., & Schmidt, R. A. (1988). Transfer of learning among motor patterns with different relative timing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 14(2), 241-252.
- Hubel, D. H., & Wiesel, T. N. (1968). Receptive fields and functional architecture of monkey striate cortex. *The Journal of Physiology*, 195, 215-243.
- Hulme, C. (1981). *Reading retardation and multisensory teaching*. Londres: Routledge & Kegan Paul.

- Hulme, C., Caravolas, M., Malkova, G., & Brigstocke, S. (2005). Phoneme isolation ability is not simply a consequence of letter-sound knowledge. *Cognition*, 97, B1-B11.
- Ikeda, M., & Uchikawa, K. (1978). Integrating time for visual pattern perception and a comparison with the tactile mode. *Vision Research*, 18(11), 1565-1571.
- Itakura, S., & Imamizu, H. (1994). An exploratory study of mirror-image shape discrimination in young children : vision and touch. *Perceptual and Motor Skills*, 78, 83-88.
- Jacobs, R. A. (2002). What determines visual cue reliability? *Trends in Cognitive Sciences*, 6(8), 345-350.
- James, K. H. (2010). Sensori-motor experience leads to changes in visual processing in the developing brain. *Developmental Science*, 13(2), 279-288.
- James, K. H., & Atwood, T. P. (2009). The role of sensorimotor learning in the perception of letter-like forms: Tracking the causes of neural specialization for letters. *Cognitive Neuropsychology*, 26(1), 91-110.
- James, K. H., & Gauthier, I. (2006). Letter processing automatically recruits a sensory-motor brain network. *Neuropsychologia*, 44, 2937-2949.
- James, T. W., Humphrey, G. K., Gati, J. S., Menon, R. S., & Goodale, M. A. (2002). Differential Effects of Viewpoint on Object-Driven Activation in Dorsal and Ventral Streams. *Neuron*, 35, 793-801.
- James, T. W., Humphrey, G. K., Gati, J. S., Servos, P., Menon, R. S., & Goodale, M. A. (2002). Haptic study of three-dimensional objects activates extrastriate visual areas. *Neuropsychologia*, 40, 1706-1714.
- Jeannerod, M. (2001). Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition. *Neuroimage*, 14, 103-109.
- Jongmans, M. J., Linthorst-Bakker, E., Westenberg, Y., & Smits-Engelsman, B. C. (2003). Use of a task-oriented self-instruction method to support children in primary school with poor handwriting quality and speed. *Hum Mov Sci*, 22(4-5), 549-566.
- Kandel, S., Orliaguet, J.-P., & Viviani, P. (2000). Perceptual anticipation in handwriting : The role of implicit motor competence. *Perception and Psychophysics*, 62, 706-716.
- Karni, A., Meyer, G., Hipolito, R. C., Jezard, P., Adams, M. M., Turner, R., & Ungerleider, L. G. (1998). The acquisition of skilled motor performance: fast and slow experience-driven changes in primary motor cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 95(3), 861-868.
- Kato, C., Isoda, H., Takehar, Y., Matsuo, K., Moriya, T., & Nakai, T. (1999). Involvement of motor cortices in retrieval of kanji studied by functional MRI. *NeuroReport*, 10, 1335-1339.
- Kennedy, J. M. (1993). *Drawing and the Blind*. New Haven: Yale University Press.
- Kennedy, J. M., & Bai, J. (2002). Haptic pictures: Fit judgments predict identification, recognition memory, and confidence. *Perception*, 31, 1013-1026.
- Kim, R., Seitz, A., & Shams, L. (2008). Benefits of Stimulus Congruency for Multisensory Facilitation of Visual Learning. *PLoS ONE*, 3(1), e1532.
- Kirk, S. A. (1933). The influence of manual tracing on the learning of simple words in the case of subnormal boys. *Journal of Educational Psychology*, 24(7), 525-535.
- Klatzky, R. L., Lederman, S. J., & Metzger, V. (1985). Identifying objects by touch: An "expert system". *Perception & Psychophysics*, 37(4), 299-302.
- Klatzky, R. L., Loomis, J. M., Lederman, S. J., Wake, H., & Fujita, N. (1993). Haptic identification of objects and their depictions. *Perception & Psychophysics*, 54(2), 170-178.

- Koziatek, S. M., & Powell, N. J. (2003). Pencil grips, legibility, and speed of fourth-graders' writing in cursive. *The American Journal of Occupational Therapy*, 57(3), 284-288.
- Kulp, M. T. (1999). Relationship between visual motor integration skill and academic performance in kindergarten through third grade. *Optometry & Vision Science*, 76(3), 159-163.
- Kunde, W., & Kiesel, A. (2006). See what you've done! Active touch affects the number of perceived visual objects. *Psychonomic Bulletin & Review*, 13(2), 304-309.
- Labat, H., Ecalle, J., & Magnan, A. (2010). Effet d'entraînements bi-modaux à la connaissance des lettres. Etude transversale chez des enfants de 3 et 5 ans. *Psychologie Française*, 55(2), 113-127.
- Laberge, D., & Samuels, S. J. (1974). Toward a theory of automatic information processing in reading. *Cognitive Psychology*, 6, 293-323.
- Lacquaniti, F., Terzuolo, C., & Viviani, P. (1983). The law relating the kinematic and figural aspects of drawing movements. *Acta Psychologica*, 54, 115-130.
- Lanthier, S. N., Risko, E. F., Stolz, J. A., & Besner, D. (2009). Not all visual features are created equal: Early processing in letter and word recognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, 16(1), 67-73.
- Larsen, A., & Bundesen, C. (1992). The efficiency of holistic template matching in the recognition of unconstrained handwritten digits. *Psychological Research*, 54, 187-193.
- Laszlo, J. I., & Bairstow, P. J. (1983). Kinaesthesia: Its measurement, training and relationship to motor control. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 35(2), 411 - 421.
- Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (1987). Hand movements: A window into haptic object recognition. *Cognitive Psychology*, 19(3), 342-368.
- Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (1990). Haptic classification of common objects : Knowledge-driven exploration. *Cognitive Psychology*, 22(4), 421-459.
- Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (1993). Extracting object properties through haptic exploration. *Acta Psychologica*, 84, 29-40.
- Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (1997). Relative availability of surface and object properties during early haptic processing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23, 1680-1707.
- Lederman, S. J., Klatzky, R. L., Chataway, C., & Summers, C. D. (1990). Visual mediation and the haptic identification of 2-dimensional pictures of common objects. *Perception & Psychophysics*, 47(1), 54-64.
- Lerner, Y., Hendler, T., & Malach, R. (2002). Object-completion effects in the human lateral occipital complex. *Cerebral Cortex*, 12(2), 163-177.
- Levin, I., Shatil-Carmon, S., & Asif-Rave, O. (2006). Learning of letter names and sounds and their contribution to word recognition. *Journal of Experimental Child Psychology*, 93(2), 139-165.
- Lindsay, P., & Norman, D. A. (1977). *Human Information Processing: An Introduction to Psychology*. New York: Academic Press.
- Liu, J., Cramer, S., & Reinkensmeyer, D. (2006). Learning to perform a new movement with robotic assistance: comparison of haptic guidance and visual demonstration. *Journal of Neuroengineering Rehabilitation*, 3, 1743.
- Longcamp, M., Anton, J. L., Roth, M., & Velay, J.-L. (2005). Premotor activations in response to visually presented single letters depend on the hand used to write: a study on left-handers. *Neuropsychologia*, 43(12), 1801-1809.

- Longcamp, M., Anton, J. L., Roth, M., & Velay, J. L. (2003). Visual presentation of single letters activates a premotor area involved in writing. *NeuroImage*, 19, 1492-1500.
- Longcamp, M., Boucard, C., Gilhodes, J.-C., & Velay, J.-L. (2006). Remembering the orientation of newly learned characters depends on the associated writing knowledge: A comparison between handwriting and typing. *Human Movement Science*, 25(4-5), 646-656.
- Longcamp, M., Zerbato-Poudou, M. T., & Velay, J. L. (2005). The influence of writing practice on letter recognition in preschool children: a comparison between handwriting and typing. *Acta Psychologica*, 119(1), 67-79.
- Loomis, J. M., Klatzky, R. L., & Lederman, S. J. (1991). Similarity of tactual and visual picture recognition with limited field of view. *Perception*, 20(2), 167-177.
- Lord, R., & Hulme, C. (1987). Kinaesthetic sensitivity of normal and clumsy children. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 29, 720-725.
- Lukatela, K., Carello, C., Shankweiler, D. P., & Liberman, I. Y. (1995). Phonological awareness in illiterates: Observations from Serbo-Croatian. *Applied Psycholinguistics*(16), 463-487.
- Lurçat, L. (1974). *Etudes de l'acte graphique*. Paris: Mouton.
- Magee, L. E., & Kennedy, J. M. (1980). Exploring pictures tactually. *Nature*, 283, 287-288.
- Malach, R., Levy, I., & Hasson, U. (2002). The topography of high-order human object areas. *Trends in Cognitive Sciences*, 6, 176-184.
- Malach, R., Reppas, J. B., Benson, R. R., Kwong, K. K., Jiang, H., Kennedy, W. A., . . . Tootell, R. B. (1995). Object related activity revealed by functional magnetic resonance imaging in human occipital cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 92, 8135-8139.
- Manis, F. R., Doi, L. M., & Bhadha, B. (2000). Naming speed, phonological awareness, and orthographic knowledge in second graders. *Journal of Learning Disabilities*, 33, 325-333.
- Manis, F. R., Seidenberg, M. S., & Doi, L. M. (1999). See Dick RAN: Rapid naming and the longitudinal prediction of reading subskills in first and second graders. *Scientific Studies of Reading*, 3(2), 129-157.
- Marendaz, C., Rousset, S., & Charnallet, A. (2003). Reconnaissance des scènes, des objets et des visages. In A. Delorme & M. Flückige (Eds.), *Perception et Réalité* Bruxelles De Boeck.
- Marr, D., & Nishihara, H. K. (1978). Representation and recognition of the spatial organization of three-dimensional shapes. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 200, 269-294.
- McBride-Chang, C. (1999). The ABC's of the ABC's: The development of letter-name and letter-sound knowledge. *Merrill-Palmer Quarterly*, 45, 278-301.
- McCandliss, B. D., Cohen, L., & Dehaene, S. (2003). The visual word form area: expertise for reading in the fusiform gyrus. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 293-299.
- McClelland, J. L. (1977). Letter and configuration information in word identification. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 16(1), 137-150.
- McGurk, H., & McDonald, J. (1976). Hearing lips and seeing voices. *Nature*, 264, 746-748.
- Méary, D., Chary, C., Palluel-Germain, R., & Orliaguet, J.-P. (2005). Visual perception of pointing and writing movements. *Perception*, 34, 1061-1067.
- Meulenbroek, R. G. J., Vinter, A., & Mounoud, P. (1993). Development of the start-rotation principle in circle production. *British journal of developmental psychology*, 11(3), 307-320.

- Miller, J. (1982). Divided attention: evidence for coactivation with redundant signals. *Cognitive Psychology*, 14, 247-279.
- Miller, J. (1986). Timecourse of coactivation in bimodal divided attention. *Perception & Psychophysics*, 40, 331-343.
- Miller, J. (1991). Channel interaction and the redundant-targets effect in bimodal divided attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 17, 160-169.
- Miozzo, M., & Caramazza, A. (1998). Varieties of pure alexia: the case of failure to access graphemic representations. *Cognitive Neuropsychology*, 15(1/2), 203-238.
- Montessori. (1912). *The Montessori method : scientific pedagogy as applied to child education in "the Children's Houses" with additions and revisions*. New York: Frederick A. Stokes Company.
- Morais, J., Bertelson, P., Cary, L., & Alegria, J. (1986). Literacy training and speech segmentation. *Cognition*, 24, 45-64.
- Morais, J., Cary, L., Alegria, J., & Bertelson, P. (1979). Does awareness of speech as a sequence of phones arise spontaneously. *Cognition*, 7, 323-331.
- Murray, E. A., Malkova, L., & Goulet, S. (1998). In A. D. Milner (Ed.), *Comparative neuropsychology* (pp. 51-69). Oxford: Oxford University Press.
- Murray, M. M., Molholm, S., Michel, C. M., Heslenfeld, D. J., Ritter, W., D.C., J., . . . Foxe, J. J. (2005). Grabbing your ear: rapid auditory-somatosensory multisensory interactions in low-level sensory cortices are not constrained by stimulus alignment. *Cerebral Cortex*, 15, 963-974.
- Muter, V., Hulme, C., Snowling, M., & Taylor, S. (1998). Segmentation not rhyming predicts early progress in learning to read. *Journal of Experimental Child Psychology*, 71, 3-27.
- Mycroft, R., Hanley, J. R., & Kay, J. (2002). Preserved access to abstract letter identities despite abolished letter naming in a case of pure alexia. *Journal of Neurolinguistics*, 15(2), 99-108.
- Naka, M. (1998). Repeated writing facilitates children's memory for pseudocharacters and foreign letters. *Memory and Cognition*, 26, 804-809.
- Naka, M., & Naoi, H. (1995). The effect of repeated writing on memory. *Memory & Cognition* 23(2), 201-212.
- Ohlmann, T. (1990). Les systèmes perceptifs vicariants. In M. Reuchlin, J. Lautrey, C. Marendaz & T. Ohlmann (Eds.), *Cognition: l'individuel et l'universel* (pp. 21-58). Paris: Presses Universitaires de France.
- Orliaguet, J.-P., Kandel, S., & Boë, L.-J. (1997). Visual perception of motor anticipation in cursive handwriting: Influence of spatial and movement information on the prediction of forthcoming letters. *Perception*, 26(7), 905 - 912.
- Paap, K. R., Newsome, S. L., & Noel, R. W. (1984). Word shape's in poor shape for the race to the lexicon. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 10(3), 413-428.
- Paillard, J. (1990). Les bases nerveuses du contrôle visuo-manuel de l'écriture. In C. Sirat, J. Irigoien & E. Poulle (Eds.), *L'écriture le cerveau l'oeil et la main* (Vol. 10, pp. 23-58). Paris: Brepols-Turnhout.
- Palluel-Germain, R., Bara, F., Hennion, B., Gouagout, P., & Gentaz, E. (2006). *Early handwriting acquisition: Evaluation of Telemaque, a new visuo-haptic interface*. Paper presented at the Eurohaptics, Paris.
- Paquet, L. (1999). Revisiting the global-dominance phenomenon outside the focus of attention. *Perception*, 28(11), 1329-1345.
- Pascual-Leone, A., & Hamilton, R. (2001). The metamodal organization of the brain. *Progress in brain research*, 134, 427-445.

- Pelli, D. G., Burns, C. W., Farell, B., & Moore-Page, D. C. (2006). Feature detection and letter identification. *Vision Research* 46(28), 4646-4674.
- Pelli, D. G., Farell, B., & Moore, D. C. (2003). The remarkable inefficiency of word recognition. *Nature*, 423, 752-756.
- Perea, M., & Rosa, E. (2002). Does “whole word shape” play a role in visual word recognition? *Perception and Psychophysics*, 64, 785-794.
- Peressotti, F., & Grainger, J. (1999). The role of letter identity and letter position in orthographic priming. *Perception and Psychophysics*, 61, 691-706.
- Petit, J.-P., Midgley, K. J., Holcomb, P. J., & Grainger, J. (2006). On the time course of letter perception: A masked priming ERP investigation. *Psychonomic Bulletin & Review*, 13(4), 674-681.
- Peyrin, C., Schwartz, S., Seghier, M., Michel, C., Landis, T., & Vuilleumier, P. (2005). Hemispheric specialization of human inferior temporal cortex during coarse-to-fine and fine-to-coarse analysis of natural visual scenes. *NeuroImage*, 28(2), 464-473.
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1947/1956). *La représentation de l'espace chez l'enfant*. Paris: PUF.
- Pick, H. L. J., & Teulings, H. L. (1983). Geometric transformations of handwriting as a function of instruction and feedback. *Acta Psychologica*, 54(1-3), 327-340.
- Plaut, D. C., McClelland, J. L., Seidenberg, M. S., & Patterson, K. (1996). Understanding normal and impaired word reading : Computational principles in quasi regular domains. *Psychological Review*, 103, 56-115.
- Posner, M. I., & Keele, S. W. (1967). Decay of visual information from a single letter. *Science*, 158, 137-139.
- Prather, S. C., Votaw, J. R., & Sathian, K. (2004). Task-specific recruitment of dorsal and ventral visual areas during tactile perception. *Neuropsychologia*, 42, 1079-1087.
- Price, C. J., & Devlin, J. T. (2003). The myth of the visual word form area. *NeuroImage*, 19, 473-481.
- Price, C. J., & Devlin, J. T. (2004). The pro and cons of labelling a left occipitotemporal region: "the visual word form area". *NeuroImage*, 22, 477-479.
- Radeau, M., & Bertelson, P. (1987). Auditory-visual interaction and the timing of inputs. thomas (1941) revisited. *Psychological Research*, 49(1), 17-22.
- Raij, T., Uutela, K., & Hari, R. (2000). Audiovisual integration of letters in the human brain. *Neuron*, 28, 617-625.
- Ramus, F. (2003). Developmental dyslexia: specific phonological deficit or general sensorimotor dysfunction? . *Current opinion in neurobiology*, 13, 212-218.
- Read, C., Zhang, Y., Nie, H., & Ding, B. (1986). The ability to manipulate speech sounds depends on knowing alphabetic writing. *Cognition*, 24, 31-34.
- Reed, C. L., & Caselli, R. J. (1994). The nature of tactile agnosia: a case study. *Neuropsychologia*, 32, 527-539.
- Reisberg, D., McLean, J., & Goldfield, A. (1987). Easy to hear but hard to understand : a lipreading advantage with intact auditory stimuli. In B. Dodd & R. Campbell (Eds.), *Hearing by eye : The psychology of lipreading* (pp. 93-113). London: Lawrence Erlbaum Associates.
- Rey, A., Ziegler, J. C., & Jacobs, A. M. (2000). Graphemes are perceptual reading units. *Cognition*, 74, 1-12.
- Richardson, M. J. E., & Flash, T. (2002). Comparing smooth arm movements with the two-third power law and the related segmented control hypothesis. *Journal of Neuroscience*, 22(18), 8201-8211.

- Robles-De-La-Torre, G. (2002). *Comparing the role of lateral force during active and passive touch*. Paper presented at the Eurohaptics, Edinburgh.
- Roll, J.-P. (1994). Sensibilités cutanées et musculaires. In M. Richelle, J. Requin & M. Robert (Eds.), *Traité de Psychologie expérimentale* (Vol. I, pp. 483-542). Paris: Presse Universitaire de France.
- Rondal, J. A. (1997). *L'évaluation du langage*. Liège: Mardaga.
- Ross, S., Treiman, R., & Bick, S. (2004). Task demands and knowledge influence how children learn to read words. *Cognitive Development*, 19, 417-431.
- Roux, F.-E., Dufor, O., Giussani, C., Wamain, Y., Draper, L., Longcamp, M., & Démonet, J.-F. (2009). The graphemic/motor frontal area (GMFA): Exner's area revisited. *Annals of Neurology*, 66, 537-545.
- Rumelhart, D. E., & McClelland, J. L. (1982). An interactive activation model of context effects in letter perception: II. The contextual enhancement effect and some tests and extensions of the model. *Psychological Review*, 89(1), 60-94.
- Sandak, R., Mencl, W. E., Frost, S. J., Rueckl, J. G., Katz, L., Moore, D. L., . . . Pugh, K. R. (2004). The neurobiology of adaptive learning in reading: a contrast of different training conditions. *Cognitive, Affective and Behavioral Neuroscience*, 4, 67-88.
- Sanocki, T. (1993). Time course of object identification: evidence for a global-to-local contingency. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19, 878-898.
- Sanocki, T. (1999). Constructing Structural Descriptions. *Visual Cognition*, 6(3/4), 299-318.
- Sathian, K., & Lacey, S. (2007). Cross-modal Involvement of Visual Cortex in Tactile Perception. In F. M & L. J (Eds.), *Spatial Processing in Navigation, Imagery and Perception* (pp. 119-134): Springer US.
- Scarborough, H. S. (1998). Early identification of children at risk for reading disabilities: Phonological awareness and some other promising predictors. In B. K. Shapiro, P. J. Accardo & A. J. Capute (Eds.), *Specific reading disability: A view of the spectrum* (pp. 75-107): Timonium, MD: York Press.
- Schatschneider, C., Carlson, C. D., Francis, D. J., Foorman, B. R., & Fletcher, J. M. (2002). Relationship of rapid automatized naming and phonological awareness in early reading development: Implications for the double-deficit hypothesis. *Journal of Learning Disabilities*, 35, 245-256.
- Schatschneider, C., Fletcher, J. M., Francis, D. J., Carlson, C. D., & Foorman, B. R. (2004). Kindergarten Prediction of Reading Skills: A Longitudinal Comparative Analysis. *Journal of Educational Psychology*, 96(265-282).
- Schlaggar, B. L., & McCandliss, B. D. (2007). Development of Neural Systems for Reading. *Annual Review of Neuroscience*, 30, 475-503.
- Schneck, C. M. (1991). Comparison of pencil-grip patterns in first graders with good and poor writing skills. *The American Journal of Occupational Therapy*, 45(8), 701-706.
- Schroeder, C. E., Lindsley, R. W., Specht, C., Marcovici, A., Smiley, J. F., & Javitt, D. C. (2001). Somatosensory input to auditory association cortex in the macaque monkey. *Journal of Neurophysiology*, 85, 1322-1327.
- Schyns, P. G., & Olivia, A. (1994). From blobs to boundary edges: Evidence for time and spatial scale dependent scene recognition. *Psychological Science*, 5(4), 195-200.
- Sciaky, R., Lacquaniti, F., Terzuolo, C., & Soechting, J. F. (1987). A note on the kinematics of drawing movements in children. *Journal of Motor Behavior*, 19, 518-525.
- Scott, J., & Ehri, L. (1990). Sight word reading in prereaders: Use of logographic vs. alphabetic access routes. *Journal of Reading Behavior*, 22, 149-166.

- Seidenberg, M. S., & McClelland, J. L. (1989). A distributed, developmental model of word recognition and naming. *Psychological review*, 96(4), 523-568.
- Seitz, A., Kim, R., & Shams, L. (2006). Sound Facilitates Visual Learning. *Current Biology*, 16, 1422-1427.
- Seitz, A. R., Kim, R., & Shams, L. (2006). Sound Facilitates Visual Learning. *Current Biology*, 16, 1422-1427.
- Seki, K., Yajima, M., & Sugishita, M. (1995). The efficacy of kinesthetic reading treatment for pure alexia. *Neuropsychologia*, 33, 595-609.
- Serniclaes, W. (2003). Dyslexie et perception phonologique. *Glossa*, 84, 4-21.
- Seymour, P. H., Aro, M., & Erskine, J. M. (2003). Foundation literacy acquisition in European orthographies. *British Journal of Psychology*, 94, 143-174.
- Shams, L., Kamitani, Y., & Shimojo, S. (2000). What you see is what you hear. *Nature*, 408, 788.
- Shams, L., & Seitz, A. R. (2008). Benefits of multisensory learning. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(11), 411-417.
- Share, D. L. (1999). Phonological Recoding and Orthographic Learning: A Direct Test of the Self-Teaching Hypothesis. *Journal of Experimental Child Psychology*, 72, 95-129.
- Share, D. L. (2004). Knowing letter names and learning letter sounds : A causal connection. *Journal of Experimental Child Psychology*, 88, 213-233.
- Shaywitz, B. A., Shaywitz, S. E., Blachman, B. A., Pugh, K. R., Fulbright, R. K., Skudlarski, P., . . . Gore, J. C. (2004). Development of left occipitotemporal systems for skilled reading in children after a phonologically- based intervention. *Biological psychiatry*, 55(9), 926-933.
- Simner, M. L. (1981). The grammar of action in children's printing. *Developmental Psychology*, 17, 866-871.
- Smith, A. M., Chapman, C. E., Donati, F., Fortier-Poisson, P., & Hayward, V. (2009). Perception of simulated local shapes using active and passive touch. *Journal of Neurophysiology*, 102, 3519-3529.
- Smits-Engelsman, B. C., Niemeijer, A. S., & van Galen, G. P. (2001). Fine motor deficiencies in children diagnosed as DCD based on poor grapho-motor ability. *Human Movement Science*, 20, 161-182.
- Smits-Engelsman, B. C., Niemeijer, A. S., & Van Galen, G. P. (2001). Fine motor deficiencies in children diagnosed as DCD based on poor grapho-motor ability. *Human Movement Science*, 20, 161-182.
- Smyth, M. M., & Silvers, G. (1987). Functions of vision in the control of handwriting. *Acta Psychologica*, 65(1), 47-64.
- Snowling, M. J. (1996). Annotation: Contemporary Approaches to the Teaching of Reading. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 37(2), 139-148.
- Sovik, N. (1974). Developmental trends of visual feedback control in copying and writing performances of children aged 7 through 11 years. *Perceptual and Motor Skills*, 39, 919-930.
- Spence, C., & Driver, J. (1997). Cross-modal links between audition, vision and touch: Implications for interface design. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 1, 351-373.
- Spence, C., & Driver, J. (2004). Exogenous spatial cuing studies of human crossmodal attention and multisensory integration. In C. Spence & J. Driver (Eds.), *Crossmodal space and crossmodal attention*. Oxford: Oxford University Press.

- Sprenger-Charolles, L. (2005). Les procédures d'accès aux mots écrits : Développement normal et dysfonctionnements dans la dyslexie développementale. *Rééducation Orthophonique*, 222, 71-100.
- Sprenger-Charolles, L., & Bonnet, P. (1996). New doubts on the importance of the logographic stage: A longitudinal study of French children. *Cahiers de Psychologie Cognitive/Current Psychology of Cognition*, 15, 173-208.
- Sprenger-Charolles, L., & Colé, P. (2003/2006). *Lecture et dyslexie : approche cognitive*. Paris: Dunod.
- Sprenger-Charolles, L., Colé, P., Béchenec, D., & Kipffer-Piquard, A. (2005). French normative data on reading and related skills from EVALEC, a new computerized battery of tests (end Grade 1, Grade 2, Grade 3, and Grade 4). *European Review of Applied Psychology/Revue Européenne de Psychologie Appliquée*, 55(3), 157-186.
- Sprenger-Charolles, L., Siegel, L. S., & Bonnet, P. (1998). Phonological mediation and orthographic factors in silent reading in French. *Scientific Study of Reading*, 2, 3-29.
- Sprenger-Charolles, L., Siegel, L. S., & Bonnet, P. (1998). Reading and spelling acquisition in French: The role of phonological mediation and orthographic factors. *Journal of Experimental Child Psychology*, 68(2), 134-165.
- Stein, B. E., & Meredith, M. A. (1993). *The merging of the senses*. Cambridge: The MIT Press.
- Symmons, M. A. (2004). *Active versus passive tactile perception*. Monash University, Melbourne.
- Symmons, M. A., & Richardson, B. L. (2000). Raised line drawings are spontaneously explored with a single finger. *Perception*, 29, 621-626.
- Tarkiainen, A., Helenius, P., Hansen, P. C., Cornelissen, P. L., & Salmelin, R. (1999). Dynamics of letter string perception in the human occipitotemporal cortex. *Brain*, 122(11), 2119-2132.
- Tarr, M. J., & Bülthoff, H. H. (1995). Is human object recognition better described by geon-structural-descriptions or by multiple-views? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 21(6), 1494-1505.
- Tarr, M. J., & Pinker, S. (1989). Mental rotation and orientation-dependence in shape recognition. *Cognitive Psychology*, 21, 233-282.
- Teulings, H. L., & Schomaker, L. R. (1993). Invariant properties between stroke features in handwriting. *Acta Psychologica*, 82, 69-88.
- Thomassen, A. J., & Van Galen, G. (1992). *Handwriting as a motor task: experimentation, modeling and simulation*. Amsterdam: North-Holland.
- Thompson, L. J., Chronicle, E. P., & Collins, A. F. (2003). The role of pictorial convention in haptic picture perception. *Perception*, 32(7), 887-893.
- Torgesen, J. K. (2002). The prevention of reading difficulties. *Journal of School Psychology*, 40, 7-26.
- Treiman, R., & Broderick, V. (1998). What's in a name: Children's knowledge about the letters in their own names. *Journal of Experimental Child Psychology*, 70(2), 97-116.
- Treiman, R., & Kessler, B. (2003). The role of letter names in the acquisition of literacy. In R. V. Kail (Ed.), *Advances in child development and behavior* (Vol. 31, pp. 105-135): San Diego: Academic Press.
- Treiman, R., Tincoff, R., & Richmond-Welty, E. D. (1996). Letter names help children to connect print and speech. *Developmental Psychology*, 32, 505-514.
- Tseng, M. H., & Cermak, S. A. (1993). The influence of ergonomic factors and perceptual-motor abilities on handwriting performance. *The American Journal of Occupational Therapy*, 47(10), 919-926.

- Tseng, M. H., & Chow, S. M. (2000). Perceptual-motor function of school-age children with slow handwriting speed. *The American Journal of Occupational Therapy*, 54, 83-88.
- Tseng, M. H., & Murray, E. A. (1994). Differences in Perceptual-Motor Measures in Children with Good and Poor Handwriting. *Occupational Therapy Journal of Research*, 14(1), 19-36.
- Ullman, S. A. (1989). ligning pictorial descriptions: an approach to object recognition. *Cognition*, 32, 193-254.
- Ullman, S. A. (1998). Three-dimensional object recognition based on the combination of views. *Cognition*, 67, 21-44.
- Valenza, N., Ptak, R., Zimine, I., Badan, M., Lazeyras, F., & Schnider, A. (2001). Dissociated active and passive tactile shape recognition: a case study of pure tactile apraxia. *Brain*, 124(2287-98).
- Van Doorn, R. R. A., & Keuss, P. J. G. (1992). The role of vision in the temporal and spatial control of handwriting. *Acta Psychologica*, 81, 269-286.
- Van Doorn, R. R. A., & Keuss, P. J. G. (1993). Does the production of letter strokes in handwriting benefit from vision? *Acta Psychologica*, 82, 275-290.
- Van Galen, G. (1991). Handwriting: Issues for a psychomotor theory. *Human Movement Science*, 10(2), 165-191.
- Van Galen, G. P., Portier, S. J., Smits - Engelsman, B. C., & Shomaker, L. R. (1993). Neuromotor noise and poor handwriting in children. *Acta Psychologica*, 82, 161-178.
- Vinter, A., & Mounoud, P. (1991). Isochrony and accuracy of drawing movements in children : Effects of age and context. In J. Wann, A. M. Wing & N. Sovik (Eds.), *The development of graphic skills* (pp. 113-134). Londres: Academic Press.
- Violentyev, A., Shimojo, S., & Shams, L. (2005). Touch-induced visual illusion. *NeuroReport*, 16(10), 1107-1110.
- Viviani, P. (1994). Les habiletés motrices. In M. Richelle, J. Requin & M. Robert (Eds.), *Traité de Psychologie Expérimentale* (pp. 777-844). Paris: Presse Universitaire de France.
- Viviani, P., & Flash, T. (1995). Minimum-jerk, two-thirds power law, and isochrony: converging approaches to movement planning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(1), 32-53.
- Viviani, P., & McCollum, G. (1983). The relation between linear extent and velocity in drawing movements. *Neuroscience*, 10(1), 211-218.
- Viviani, P., & Schneider, R. (1991). A developmental study of the relation between geometry and kinematics in drawing movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 17(1), 198-218.
- Viviani, P., & Stucchi, N. (1992). Motor-perceptual interactions. In J. Requin & G. Stelmach (Eds.), *Tutorials in Motor Behavior II* (pp. 229-248). Amsterdam: Elsevier North-Holland.
- Viviani, P., & Terzuolo, C. (1982). Trajectory determines movement dynamics. *Neuroscience*, 7(2), 431-437.
- von Kriegstein, K., Kleinschmidt, A., & Giraud, A. L. (2006). Voice recognition and cross-modal responses to familiar speakers' voices in prosopagnosia. *Cerebral Cortex*, 16, 1314-1322.
- Wagner, R. K., Torgesen, J. K., & Rashotte, C. A. (1994). Development of Reading-Related Phonological Processing Abilities: New Evidence of Bidirectional Causality From a Latent Variable Longitudinal Study. *Developmental Psychology*, 30(1), 73-87.

- Walsh, J. K. (1973). Effect of visual and tactual stimulation on learning abstract forms: A replication. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 2, 357-359.
- Wann, J. P., & Jones, J. G. (1986). Space-time invariance in handwriting: Contrasts between primary school children displaying advanced or retarded handwriting acquisition. *Human Movement Science*, 5(3), 275-296.
- Wann, J. P., & Kardiramanathan, M. (1991). Variability in childrens handwriting computer diagnosis of writing difficulties. In J. Wann, A. M. Wing & N. Sovik (Eds.), *Development of Graphic Skills* (pp. 223-236). London: Academic Press.
- Watson, C., & Willows, D. M. (1995). Information-processing patterns in specific reading disability. *Journal of learning disabilities*, 28, 216-231.
- Weil, M. J., & Amundson, S. J. (1994). Relationship between visuomotor and handwriting skills of children in kindergarten. *The American Journal of Occupational Therapy*, 48, 982-988.
- Welch, R. B., & Warren, D. H. (1986). Intersensory interactions. In J. Thomas (Ed.), *Handbook of Perception and Human Performance, Volume I: Sensory Processes and Perception* (pp. 25-36). New York: Wiley.
- Wijntjes, M. W., Lienen, T. V., Verstijnen, I. M., & Kappers, A. M. (2008). Look what I have felt: Unidentified haptic line drawings are identified after sketching. *Acta Psychologica*, 128, 255-263.
- Williams, J. (1975). Training children to copy and to discriminate letterlike forms. *Journal of Educational Psychology*, 67(6), 790-795.
- Wimmer, H., Landerl, K., Linortner, R., & Hummer, P. (1991). The relationship of phonemic awareness to reading acquisition: More consequence than precondition, but still important. *Cognition*, 40, 219-249.
- Wimmer, H., Landerl, K., & Schneider, W. (1994). The role of rhyme awareness in learning to read a regular orthography. *British Journal of Developmental Psychology*, 12, 469-484.
- Wolf, M., Bally, H., & Morris, R. (1986). Automaticity, retrieval processes and reading : A longitudinal study in average and impaired readers. *Child Development*, 57, 988-1000.
- Wolf, M., & Katzir-Cohen, T. (2001). Reading Fluency and Its Intervention. *Scientific Studies of Reading*, 5 (3), 211-239.
- Wolf, M., Miller, L., & Donnelly, K. (2000). Retrieval, automaticity, vocabulary elaboration, orthography (RAVE-O): a comprehensive, fluency-based reading intervention program. *Journal of learning disabilities*, 33, 375-386.
- Wolpert, D. M., & Flanagan, J. R. (2001). Motor prediction. *Current Biology*, 11(18), 729-732.
- Wright, C. E. (1993). Evaluating the special role of time in the control of handwriting. *Acta Psychologica*, 82(1-3), 5-52.
- Young, M. J., Landy, M. S., & Maloney, L. T. (1993). A perturbation analysis of depth perception from combinations of texture and motion cues. *Vision Research*, 33(18), 2685-2696.
- Zesiger, P. (1995). *Ecrire : Approche cognitive, neuropsychologique et développementale*. Paris: PUF.
- Ziegler, J. C., & Goswami, U. (2005). Reading acquisition, developmental dyslexia and skilled reading across languages: A psycholinguistic grain size theory. *Psychological Bulletin*, 131(1), 3-29.

Table des illustrations

Liste des tableaux

Chapitre 4. Exploration haptique des lettres : séquentialité vs. motricité

Tableau 1. Caractéristiques des enfants avant les entraînements dans chacun des groupes (moyennes et écarts-types entre parenthèses).	104 -
Tableau 2. Nombre moyen (et écarts-types) de pseudo-mots correctement décodés (max.12) avant et après chaque entraînement.	113 -
Tableau 3. Nombre moyen (et écarts-types) de lettres reconnues (max. 7) avant et après chaque entraînement.....	114 -
Tableau 4. Scores moyens et (écarts-types) dans les deux tâches métaphonémiques avant et après chaque entraînement.-	115 -

Chapitre 5. L'évaluation de la connaissance des lettres

Tableau 5. moyennes et écarts-types moyens par session pour chaque compétence évaluée.	126 -
Tableau 6. corrélations intra-sessions entre les scores aux différentes compétences alphabétiques et métaphonémiques.-	126 -
Tableau 7. corrélations intersessions entre les scores aux différentes compétences alphabétiques et métaphonémiques..-	128 -
Tableau 8. moyennes et (écarts-types moyens) par session pour l'ensemble des compétences alphabétiques et métaphonémiques en fonction du niveau de décodage en avril.	130 -

Chapitre 6. Exploration haptique de lettres et qualité des tracés

Tableau 9. Taille (en millimètres) des lettres produites par le dispositif haptique en x (axe horizontal) et y (axe vertical)-	141 -
Tableau 10. Durées de mouvements (en secondes) utilisées pour l'exercice de « tracé dynamique » en fonction des lettres et de l'essai.	142 -

Chapitre 7. Exploration haptique de formes et apprentissage des associations forme-son

Tableau 11. Caractéristiques des étudiants avant les entraînements dans chacun des groupes (moyennes et écart-types entre parenthèses).	150 -
---	-------

Chapitre 8. Exploration haptique de formes abstraites et reconnaissance visuelle

Tableau 12. Taux moyens de réponses correctes, temps de réponse moyens et (écarts-types) pour les deux modes de présentation visuelle et haptique des formes.....	168 -
Tableau 13. Nombre moyen de blocs d'apprentissage et taux moyens de réponses correctes en fonction des formes cibles et distractrices, pour les trois modalités d'apprentissage visuelle, haptique et visuo-haptique. (Les écarts-types figurent entre parenthèses).....	174 -
Tableau 14. Taux moyen de réponses correctes et temps de réponse en fonction des formes cibles et distractrices, pour les trois modalités d'apprentissage visuelle, haptique et visuo-haptique. (Les écarts-types figurent entre parenthèses).	177 -
Tableau 15. Taux moyens de réponses correctes et temps de réponse en fonction des formes cibles et distractrices, pour les trois modalités d'apprentissage visuelle, haptique et visuo-haptique. (Les écarts-types figurent entre parenthèses).	178 -

Chapitre 9. Discussion générale, perspectives et conclusions

Tableau 16. Résumé des questions posées, méthodes utilisées, principaux résultats obtenus aux différentes études réalisées ainsi que leurs conclusions et interprétations.....	185
---	-----

Liste des figures

Chapitre 1. Les modalités sensorielles et la reconnaissance des objets

- Figure 1.** Schématisation des mécanorécepteurs de la peau et des muscles de la main [Adapté de Halata et Baumann, 2008] - 6 -
- Figure 2.** Schématisation du cortex somatosensoriel. Dans la partie inférieure sont représentés les découpages des cortex somesthésique primaire et pariétal postérieur [Repris de (Bear, Connors, & Paradiso, 2001)] - 8 -
- Figure 3.** Schématisation des six « procédures exploratoires » manuelles et des propriétés des objets qui leurs sont associées. [adapté de Lederman et Klatzky, 1987] - 11 -
- Figure 4.** modèle par médiation visuelle du traitement de l'information haptique [adapté de Lederman et al., 1990]. - 18 -
- Figure 5.** Différents arrangements des mêmes composants peuvent produire différents objets [repris de Biederman, 1987]- 22 -
- Figure 6.** Trois exemples d'objets utilisés dans l'expérience de perception d'objets dégradés de Biederman. Dans la colonne de gauche sont représentées les versions originales intactes des objets. Dans la colonne du milieu, les versions reconnaissables. Les parties supprimées des contours peuvent être remplacées en utilisant le principe de colinéarité et de légères courbures. Dans la colonne de droite, les versions non reconnaissables sont figurées. Les contours ont été supprimés au niveau des courbures de l'objet. De plus, les sommets ont été modifiés, des symétries et parallélismes trompeurs ont été introduits [adapté de Biederman, 1987]. - 23 -
- Figure 7.** Exemples d'items utilisés dans la tâche d'amorçage de Stanocki. Dans la colonne de gauche sont représentés trois des objets cibles. Dans la colonne du milieu les amorces globales correspondant à chacune des cibles, et dans la colonne de droite les amorces locales [adapté de Sanocki, 1993]. - 24 -
- Figure 8.** Schématisation de la tâche de détection de mouvements cohérents. Une séquence de deux écrans comprenant les stimuli était présentée (un contenant un signal directionnel et un seulement du bruit). Après la séquence, les participants devaient rapporter l'intervalle qui contenait le signal directionnel (1 ou 2), puis donner la direction du signal (gauche ou droite). Dans la phase d'entraînement un feedback était fourni pour la réponse concernant l'intervalle. Pendant la phase test, aucun feedback n'était donné. Les flèches indiquent la direction du mouvement des points ; les points qui évoluent dans la même direction sont représentés par des flèches blanches. La première ligne représente le déroulement d'un essai de la condition unimodale (visuelle), la seconde ligne, un essai de la condition multimodale (visuelle et auditive) [repris de Seitz et al., 2006]. - 31 -
- Figure 9.** Schématisation de la situation expérimentale. (a) Les participants regardent les objets à travers une lentille cylindrique pendant qu'ils les saisissent. La forme visuelle est distordue et diffère donc de la forme spécifiée par le toucher (conflit sensoriel). (b) Dans une condition (vision directe), les participants regardent directement le stimulus. Les stimuli visuel et haptique correspondent spatialement. Dans la condition « miroir », les participants observent le stimulus visuel à travers un miroir. Ainsi, les stimuli visuel et haptique sont présentés à des localisations différentes. Les participants voient l'image miroir de leur main pendant qu'ils saisissent l'objet. Ils savent donc que les entrées sensorielles visuelle et haptique proviennent du même objet [repris de Hellwig et Ernst, 2007]. - 33 -
- Figure 44.** Superposition des cartes spatiales au niveau des colliculus supérieurs pour les modalités visuelle, auditive et somesthésique [Repris de Stein et Meredith, 1993] - 38 -
- Figure 11.** Schématisation des mécanismes d'apprentissage unisensoriel et multisensoriels. (a) pendant l'encodage dans l'entraînement unisensoriel, seules des entrées visuelles (v) sont présentes et seules des structures visuelles sont activées (en rouge). (b) Dans l'apprentissage multisensoriel, des entrées visuelles (v) et auditives (a) sont présentes et une série plus importante de structures de traitement est activée. A, V et MS représentent respectivement les aires auditives, visuelles et multisensorielles. (c), (d), (e) et (f) représentent les différentes modifications pouvant résulter de l'apprentissage. Les aires et connections qui sous-tendent l'apprentissage sont représentées en orange ; orange clair, pour de faibles degrés de plasticité et orange foncé pour de plus forts degrés. (c) Lors de l'entraînement unisensoriel, quelques modifications peuvent être effectuées dans les structures unisensorielles correspondantes. Avec l'entraînement multisensoriel, des modifications plus importantes peuvent être effectuées et peuvent se manifester dans des structures unisensorielles (d) ou multisensorielles (e) et (f) [adapté de Shams et Seitz, 2008]. - 40 -
- Figure 12.** Le modèle Pandémonium [adapté de Lindsay et Norman, 1977]. - 44 -
- Figure 13.** Exemples de tenue de crayon immature (à gauche), intermédiaire (au centre) et mature (à droite) chez des enfants de grande section de maternelle. - 59 -

Chapitre 2. La lettre: un cas particulier d'apprentissage multimodal

- Figure 14.** Les deux méthodes de production, le caractère non distordu et les six distorsions utilisées dans la phase test pour un exemple de caractère. Les flèches indiquent le sens de production et les nombres, l'ordre de production [adapté de Freyd, 1983]. - 63 -
- Figure 15.** Schématisation des résultats obtenus dans l'expérience de James et Gauthier (2006) montrant les différents réseaux multimodaux impliqués dans le processus de traitement des lettres [repris de James et Gauthier, 2006] - 66 -
- Figure 16.** Schématisation générale de l'architecture du réseau connexionniste de reconnaissance et dénomination des mots. Le modèle implémenté est représenté en gras. [adaptée de Seidenberg et McClelland, 1989] - 69 -
- Figure 17.** Représentation schématique du modèle de reconnaissance de mots à l'aide de détecteurs de combinaisons locales (modèle LCD) organisés de façon hiérarchique. Au niveau le plus bas, le système détecte les combinaisons locales d'orientation, et permet la détection de traits. A l'étape suivante, les traits sont utilisés de façon à former les contours locaux et détecter une forme de lettre. A ce niveau la lettre détectée correspond à une casse particulière. Le stade suivant permet d'identifier la lettre à un niveau plus abstrait. Les « détecteurs de lettres » peuvent coder les différentes versions d'une même lettre. Au niveau suivant les combinaisons locales de lettres sont traitées ; les neurones « bigrammes » sont sollicités. Enfin, la dernière étape consiste à traiter les combinaisons de bigrammes. Les neurones impliqués commenceraient à réagir aux morphèmes ou aux petits mots lettres et bigrammes au sein des mots [repris de Dehaene et al., 2005]. - 70 -
- Figure 18.** Schématisation du modèle de l'acquisition des habiletés de lecture et d'écriture. Chacun des trois stades (logographique, alphabétique et orthographique) est divisé en deux étapes (a et b) avec l'une ou l'autre habileté qui « arbitre » la stratégie (cf. flèches). Les nombres en indices représentent le niveau de l'habileté [adapté de Frith, 1985]. - 72 -
- Figure 45.** Représentation Schématique des compétences favorisant l'acquisition de la lecture et des modalités sensorielles intervenant dans leur acquisition. - 83 -

Chapitre 3. Les apprentissages multisensoriels de la lecture

- Figure 20.** Exemples de bras robots à retours de forces utilisés dans cette thèse : le PHANToM Desktop 1.5 (à gauche) et le PHANToM Omni (à droite) - 95 -
- Figure 21.** Exemple d'une trajectoire en trois dimensions idéale (en trait plein) et réalisée par un participant (points successifs) [repris de Feygin et al., 2002]. - 95 -

Chapitre 4. Exploration haptique des lettres : séquentialité vs. motricité

- Figure 22.** Typographie de chaque lettre. Les flèches numérotées indiquent l'ordre d'exploration des lettres. - 108 -
- Figure 23.** Les activités visuo-haptique et haptique d'exploration des lettres. Exemple d'exploration haptique de la lettre « b » réalisée les enfants les yeux ouverts puis les yeux fermés (à gauche). Exemple de discrimination haptique entre la lettre « b » (cible) et la lettre « l » (distractrice) réalisée par les enfants sans contrôle visuel (à droite)- 109 -
- Figure 24.** Exemples de lettres utilisées dans l'entraînement HVAM (lettre mobile en haut à gauche et lettre en mousse en haut à droite) et dans l'entraînement VAM (en bas) - 110 -
- Figure 25.** Extraits du film présentant au cours d'une séance de l'entraînement VAM-biologique l'écriture naturelle d'un « l » - 111 -

Chapitre 5. L'évaluation de la connaissance des lettres

- Figure 26.** Exemple de lettres cursives utilisées dans la tâche de dénomination (réduction de 55% par rapport à la taille de présentation à l'écran). - 123 -
- Figure 27.** Exemple de lettres cursives utilisées dans la tâche d'identification de lettres (réduction de 50 % par rapport à la taille de présentation à l'écran). - 125 -

Chapitre 6. Exploration haptique de lettres et qualité des tracés

- Figure 28.** Vue schématique globale de la station de travail. Les enfants sont assis devant une table, les lettres générées par l'interface visuo-haptique sont affichées sur un écran d'ordinateur horizontal. Les enfants doivent tenir un stylo attaché au bras à retour de force contrôlé par le logiciel du dispositif haptique. - 140 -
- Figure 29.** Le jeu du circuit. (A) Une lettre représentée à l'intérieur d'un rail apparaissait sur l'écran d'ordinateur. La distance entre les deux bords du rail était de 0.8 cm. (B) L'enfant saisissait le crayon – représenté à l'écran par un crayon virtuel – attaché au bras robot à retour de force. Les enfants devaient reproduire la lettre en suivant la ligne

cursive tout en restant entre les rails. Si l'enfant déviait de la trajectoire correcte ou ne produisait pas la lettre dans l'ordre correct, le dispositif haptique générerait une force qui attirait le stylo dans la bonne direction.	141 -
Figure 30. Guidage haptique en position : la force ressentie par l'utilisateur est proportionnelle au déplacement entre la position courante de l'utilisateur (courbe verte) et la position théorique de référence de la courbe modèle (en noir) [repris de Bluteau et al., 2008].	142 -
Figure 31. Les lettres sont construites à partir de points de contrôle, arcs elliptiques et lignes droites. Les points de contrôle représentent les points de départs et d'arrêt des traits, les points tangents verticaux et horizontaux et les points d'inflexion et de rebroussement. Les levers de crayon sont également décrits (tracé jaune). Entre chaque couple de points de contrôle successifs, sont calculés les arcs elliptiques minimums qui permettent le calcul des aspects dynamiques de la police en appliquant la loi de puissance des deux-tiers [Adapté de Hennion et al., 2005]. ..	143 -
Figure 32. Vitesse moyenne (A), nombre moyen de levers de crayon (B), nombre moyen de pics de vitesse (C) et erreurs standards, en fonction de la période (prétest, post-test) et du groupe d'entraînement (VH ou C).	144 -
Chapitre 7. Exploration haptique de formes et apprentissage des associations forme-son	
Figure 33. Les 15 stimuli cibles visuels et visuo-haptiques utilisés pour les deux méthodes d'apprentissage (dimension moyenne : 7.5 x 11.5cm).	151 -
Figure 34. Dix exemples de distracteurs utilisés pour les tâches de reconnaissance immédiate et différée suite aux deux méthodes d'apprentissage (dimension moyenne : 7.5 x 11.5cm).	151 -
Figure 35. Exemple d'un participant en phase d'apprentissage multisensoriel. Le participant explorait la forme en relief librement à l'aide de ses doigts ou de sa main, sous contrôle visuel, tout en prêtant attention au son qui était présenté simultanément dans le casque.	152 -
Figure 36. Nombre moyen (et erreur standard) de formes et sons correctement reconnus (maximum 15) en fonction de la méthode d'apprentissage et du délai. La ligne en pointillés correspond au niveau de chance.	156 -
Figure 37. Nombre moyen (et erreur standard) d'associations visuo-auditive et audio-visuelle correctement reconnues (maximum 15) en fonction de la méthode d'apprentissage et du délai. La ligne en pointillés correspond au niveau de chance.	157 -
Figure 38. Nombre moyen (et erreur standard) d'associations visuo-auditive et audio-visuelle correctement reconnues (maximum 15) en fonction de la méthode d'apprentissage. La ligne en pointillés correspond au niveau de chance.	158 -
Chapitre 8. Exploration haptique de formes abstraites et reconnaissance visuelle	
Figure 39. Six des 24 formes cibles utilisées dans l'étude. La longueur des trajectoires est normalisée à 180 mm. Les axes x et y indiquent la largeur et hauteur (en mm) des cibles lors de leur présentation. La croix rouge donne le point de départ de la forme.	165 -
Figure 40. Exemple d'une cible et de ses six distracteurs. La longueur des distracteurs est également normalisées (180mm)	166 -
Figure 41. Exemple de formes cibles (lignes noires) proposées pour un des 18 participants de l'expérience dans les conditions d'apprentissage visuel (V), haptique (H) et visuo-haptique (VH). Les lignes rouges représentées sur les cibles en conditions V et VH représentent les formes réellement produites par le bras robot (pour n = 7 présentations).	173 -
Figure 42. Les points représentent les taux de réponses correctes moyens après chaque bloc de présentation de la phase d'apprentissage, pour les 18 participants, en fonction de la modalité d'apprentissage (visuelle, haptique ou visuo-haptique). Les courbes exponentielles représentent l'évolution du taux d'apprentissage moyen pour l'ensemble des participants en fonction du nombre de blocs de présentation dans les trois modalités sensorielle, estimées par la méthode du Maximum de Vraisemblance.	176 -
Figure 43. Taux de réponses correctes moyens (et écarts-types) pour l'ensemble des formes cibles et distractrices en fonction de la modalité d'apprentissage (visuelle, haptique ou visuo-haptique).	179 -

Annexes

A. Matériel des prétests et post-tests, sessions d'entraînement et séance de révision (Etude 1)

Lettres cursives entraînées : a, i, r, l, t, p, b

Matériel des prétests et des post-tests

Pseudo-mots

li, ti, ba, ita, ari, abi, iba, ila, ipa, rapi, tiba, lati

Identification de phonèmes en position initiale

Items d'entraînement :

canard / couteau – nuage – gâteau

nez / noix – feu – cartable

singe / salade – verre – clou

Items test :

-a- haricot / avion – télé – éléphant

-i- iris / île – vase – gomme

-r- roseau / roue – ciseaux – poupée

-l- lézard / lavabo – peigne – collier

-t- table / torchon – bonnet – peluche

-p- pain / poussette – marteau – cerise

-b- bague / bouée – chemise – stylo

Identification de phonèmes en position finale

Items d'entraînement :

trousse / brosse – roi – fruits

orange / cage – manteau – croissant

douche / peluche – gant – classeur

Items test :

-a- koala / compas – fauteuil – short

-i- lit / toupie – clé – pomme

-r- poire / voiture – chaussons – balle

-l- cheval / bulle – camion – éponge

-t- noisette / carte – glace – livre

-p- lampe / taupe – montre – escargot

-b- colombe / herbe – vélo – tigre

Matériel des séances d'entraînement

Phonème /a/

Comptine

Marina et son papa

Mangent des glaces au chocolat

Oh lala, oh lala,

Il n'y en aura pas pour le repas

C'est pas grave,

À la place, il y aura

De l'ananas

Posters

Phonème en position initiale :

Cibles : abeille – allumettes – abricot

Distracteurs : fauteuil – chameau – gâteau

Phonème en position finale :

Cibles : pizza – rat – caméra

Distracteurs : violon – fraise – skieur

Cartes

Phonème en position initiale : arc – ardoise – araignée – hache – anneau – argent

Phonème en position finale : pas – chocolat – cobra – cadenas – chat

Phonème /i/

Comptine

Une souris sur un tapis
Grignotait un p'tit radis
Grise était la souris
Rose était le radis
Mais le gros chat mistigri
A mangé la p'tite souris
Et il a laissé le radis
Un radis ? Pour Mistigri

Posters

Phonème en position initiale :

Cibles : igloo – hippopotame – hirondelle

Distracteurs : guitare – cadeau – champignon

Phonème en position finale :

Cibles : riz – rôti – souris

Distracteurs : grenouille – sandwich – crayon

Cartes

Phonème en position initiale : hibou – île – immeuble – hippocampe – images – hiver

Phonème en position finale : scie – nid – fourmi – cadi – momie – radis

Phonème /r/

Comptine

Qui mang'ra du riz ?
C'est le roi, c'est le rat
C'est le roi des rats
Qui mang'ra du riz ?
Ni le roi, ni le rat
Ni le roi des rats

Posters

Phonème en position initiale :

Cibles : rose – reine – robe

Distracteurs : masque – sac – dauphin

Phonème en position finale :

Cibles : classeur – chaussures – cuillères

Distracteur : papillon – bouteille – escalier

Cartes

Phonème en position initiale : raisin – route – requin – râteau – radis – ruche

Phonème en position finale : peinture – castor – fleur – verre – beurre – guitare

Phonème /l/

Comptine

Léo doit se lever
Pour aller se laver
Il aimerait rester au lit
Mais aujourd'hui c'est lundi
Il met son pantalon
Son pull et son blouson
Boit son lait
Noie ses lacets
Et s'en va à l'école

Posters

Phonème en position initiale :

Cibles : loup – luge – lapin

Distracteurs : renard – bottes – chaise

Phonème en position finale :

Cibles : étoile – poule – sel

Distracteurs : toit – mouche – canard

Cartes

Phonème en position initiale : légo – lit – lion – louche – lait – lutin

Phonème en position finale : pendule – cagoule – bol – pelle – moules – journal

Phonème /t/

Comptine

Titi tape sur son tambour
La taupe Tina terrifiée
Sort la tête de son terrier
« Arrête ton tapage »
Tu vas nous rendre toc toc
Mais Titi tape tape tape
Encore et toujours
Sur son p'tit tambour

Posters

Phonème en position initiale :

Cibles : tortue – tomate – tambour

Distracteurs : chapeau – poisson – cerf

Phonème en position finale :

Cibles : pâtes – boîte – lunettes

Distracteurs : soleil – cochon – poulet

Cartes

Phonème en position initiale : tasse – tableau – téléphone – tournevis – toit – tapis

Phonème en position finale : carotte – brouette – mouette – porte – veste

Phonème /p/

Comptine

Pauvre petit papa
Parti pour Paris
Pour pêcher plusieurs
Petits poissons pourris
Passant par plusieurs
Petits ponts
Pour pêcher plusieurs
Petits poissons

Posters

Phonème en position initiale :

Cibles : parc – pinguin – piscine

Distracteurs : château – mouton – oie

Phonème en position finale :

Cibles : loupe – guêpe – écharpe

Distracteurs : balai – chèvre – citron

Cartes

Phonème en position initiale : parasol – pantalon – poule – pastèque – plante – piano

Phonème en position finale : coupe – crêpe – soupe – jupe – tulipe – cape

Phonème /b/

Comptine

Bali balo sur un bateau
Se balade sur l'eau du bain
De Lisbonne à Bilbao,
Buvant bon et buvant bien
Bali barbotte sans bouée
C'est ballot, il est tombé
Avec ses bottes, son bonnet,
Il bat l'eau comme un benêt

Posters

Phonème en position initiale :

Cibles : bougie – baleine – bateau

Distracteurs : chien – journal – coq

Phonème en position finale :

Cibles : robe – globe – tube

Distracteurs : couteau – vache – hérisson

Cartes

Phonème en position initiale : batterie, balançoire, barque, ballon, bouton

Phonème en position finale : cubes, globe, robe, crabe, tombe

Matériel de la séance de révision

Les dominos

Phonèmes en position initiale

Tracteur / landau, laine / agrafeuse, arbre / tabouret
Tondeuse / hibou, hippopotame / biberon, baignoire /
réveil
Radio / pieuvre, perroquet / arrosoir, anorak / train
Thermomètre / images, igloo / bracelet, berceau / règle
Rhinocéros / pouce, pinceaux / lessive, limace / toboggan

Phonèmes en position finale

Frites / colle, crocodile / panda, pyjama / marionnette
Casquette / ski, pie / tube, robe / ceinture
Hélicoptère / harpe, nappe / boa, soldat / flûte
Cravate / kiwi, tapis / cube, crabe / placard
Facteur / enveloppe, écharpe / ampoule, poubelle /
cuvette

B. Matériel des tâches d'habiletés métaphonémiques et du décodage de pseudo-mots (Etude 2)

Lettres cursives évaluées : o, u, r, n, p, b

Pseudo-mots

ro, up, ur, nob, opu, bru, pro, nuo, nubo, puno, bruo, nuob

Identification de phonèmes en position
initiale

Items d'entraînement :

Hiver/ image – bouche – lutin

Lunette/ lézard – pinceau – timbre

Items test :

-o- *orange/ olive* – mouton – abeille

-u- *usine/ hublot* – tente – épée

-r- *requin/ râteau* – mouche – pile

-n- *niche/ nuage* – poulet – cintre

-b- *ballon/ berger* – signe – pompe

-p- *pain / poussette* – marteau – cerise

Identification de phonèmes en position
finale

Items d'entraînement :

Panda/ cobra – chemise – télé

Nappe/ lampe – frite – gomme

Items test :

-p- *lampe / taupe* – montre – escargot

-o- *vélo/ chapeau* – cerise – antenne

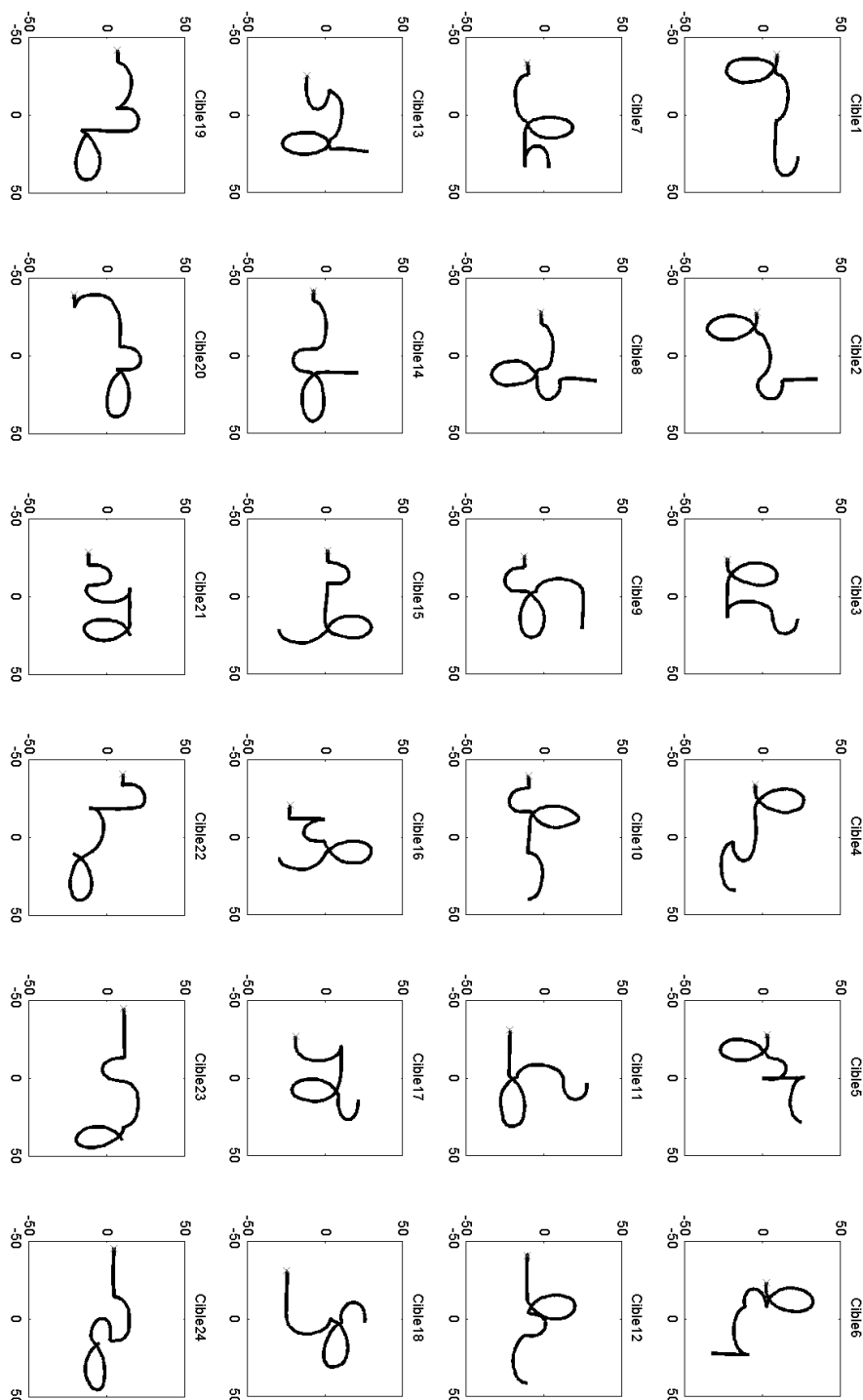
-u- *menu/ tissu* – poubelle – cloche

-r- *castor/ peinture* – hibou – soleil

-n- *lune/ canne* – zèbre – petit

-b- *cubes/ jambe* – citron – lapin

C. Les 24 formes abstraites cibles (Etude 5)



Les 24 formes cibles utilisées dans l'étude 5. La longueur des trajectoires est normalisée à 180 mm. Les axes x et y indiquent la largeur et hauteur (en mm) des cibles lors de leur présentation. La croix grise donne le point de départ de la forme.

D. Valorisation de la thèse

Publications

Articles publiés dans des revues internationales ou nationales avec comité de lecture

- Hillairet de Boisferon, A.**, Colé, P., & Gentaz, E. (2010). Connaissance du nom et du son des lettres, habiletés métaphonémiques et capacités de décodage en grande section de maternelle. *Psychologie Française*, 55, 91-111.
- Fredembach, B., **Hillairet de Boisferon, A.**, & Gentaz, E. (2009). Learning of arbitrary association between visual and auditory novel stimuli in adults: the “bond effect” of haptic exploration. *Plos One*, 4(3) :e4844.
- Gentaz, E., Bara, F., Palluel-Germain, R., Pinet, L., & **Hillairet de Boisferon, A.** (2009). Apports de la modalité haptique manuelle dans les apprentissages scolaires (lecture, écriture et géométrie). In *Cognito : Cahiers Romans de Sciences Cognitives*, 3.3, 1-38.
- Gentaz, E., Bluteau, J., & **Hillairet de Boisferon, A.** (2008). Réalité virtuelle et gestes grapho-moteurs : apport des guidages haptiques pour (ré)-apprendre à tracer des lettres. *Neuropsychology news*, 7(4), 156-160.
- Hillairet de Boisferon, A.**, Bara, F., Gentaz, E., & Colé, P. (2007). Préparation à la lecture des jeunes enfants: Effets de l'exploration visuo-haptique des lettres et de la perception visuelle des mouvements d'écriture. *L'Année Psychologique*, 107, 537-564.
- Palluel-Germain, R., Bara, F., **Hillairet de Boisferon, A.**, Hennion, B., Gouagout, P., & Gentaz, E. (2007). A visuo-haptic device - Telemaque - increases the kindergarten children's handwriting acquisition. *IEEE WorldHaptics*, 72-77.

Articles publiés dans des revues sans comité de lecture

- Bluteau, J., **Hillairet de Boisferon, A.**, & Gentaz, E. (2009). Apprendre à écrire: apports des interfaces haptiques. *Techniques de l'ingénieur, RE 131*, 1-8.

Chapitre d'ouvrage

- Hillairet de Boisferon, A.**, Bluteau, J., & Gentaz, E. (2010). The assessment of spatial features and kinematics of characters: an analysis of subjective and objective measures, In M.Mori (Ed.), *Character recognition* (pp. 113-138). Sciyo.

Communications

Communications orales

- Hillairet de Boisferon, A.** (2008). Effect of visuo-haptic exploration of letters in the reading acquisition. 29th *International congress of Psychology*, juillet, Berlin, Allemagne.
- Hillairet de Boisferon, A. & Gentaz, E.** (2007). A visuo-haptic device - Telemaque - increases the kindergarten children's handwriting acquisition. *WorldHaptics*, 24 mars, Tsukuba, Japon.
- Hillairet de Boisferon, A.** (2006). Evaluation de l'interface visuo-haptique "Télémaque" dans l'apprentissage de l'écriture chez les enfants scolarisés en GSM. 2^{èmes entretiens de la psychologie}, 04 novembre, Boulogne Billancourt, France.

Communications affichées

- Hillairet de Boisferon, A. & Gentaz, E.** (2008). Learning of arbitrary association between visual and auditory novel stimuli in adults: the "bond effect" of haptic exploration. 49th *Annual Meeting of the Psychonomic Society*, 13-16 novembre, Chicago, Etats-Unis.
- Hillairet de Boisferon, A., Palluel-Germain, R. Bara, F., Hennion, B., Gouagout, P., & Gentaz, E.** (2008). Une Interface Visuo-haptique Destinée à Préparer l'Apprentissage de l'Ecriture. 7^{ème} *journée de l'Ecole Doctorale Ingénierie pour la Santé, la Cognition et l'Environnement*, La Tronche, France, 19 mai.
- Prix de la meilleure communication affichée, ex aequo.*
- Gentaz, E. & Hillairet de Boisferon, A.** (2007). Télémaque, une nouvelle interface visuo-haptique pour apprendre à mieux écrire. *Journée des soins infirmiers, de rééducation et médico-technique*, 27 février, Grenoble, France.

Diffusion du savoir

- Hillairet de Boisferon, A.** (2007) Télémaque, une nouvelle interface visuo-haptique pour apprendre à mieux écrire. 10^{ème} *édition du forum 4i[®]*, 26 avril, Grenoble, France
- Gentaz, E. & Hillairet de Boisferon, A.** (2006). Télémaque, une nouvelle interface visuo-haptique pour apprendre à mieux écrire. 14^e *Carrefour de la Fondation Rhône-Alpes Futur*, 30 novembre, Lyon, France.
- Prix de l'innovation de la fondation Rhône-Alpes Futur*
- Hillairet de Boisferon, A.** (2006). Influence de la modalité haptique dans l'apprentissage de la lecture chez les jeunes enfants. *Journée Annuelle de l'Association Montessori Française*, mai, Paris, France.

E. Article 1 : Hillairet de Boisferon, Bara, Colé & Gentaz (2007)

Hillairet de Boisferon, A., Bara, F., Colé, P., & Gentaz, E. (2007). Préparation à la lecture des jeunes enfants : effets de l'exploration visuo-haptique des lettres et de la perception visuelle des mouvements d'écriture. *L'année Psychologique*, 107, 537-564

Préparation à la lecture des jeunes enfants : effets de l'exploration visuo-haptique des lettres et de la perception visuelle des mouvements d'écriture

Anne Hillairet de Boisferon¹, Florence Bara²,
Edouard Gentaz^{*1}, et Pascale Colé²

¹ CNRS, Laboratoire Psychologie et NeuroCognition, UMR 5105,
Université Pierre Mendès France

² CNRS, Laboratoire Psychologie et NeuroCognition, UMR 5105, Université de Savoie

RÉSUMÉ

L'ajout de l'exploration visuo-haptique et haptique des lettres dans des entraînements de préparation à la lecture améliore la compréhension et l'utilisation du principe alphabétique chez les enfants de 5 ans. Pour mieux comprendre la nature de cet effet bénéfique, trois entraînements proposant également des activités destinées à développer la conscience phonémique, la connaissance des lettres et des associations graphème/phonème sont évalués. Ces trois entraînements se différencient par la manière dont les lettres sont explorées. Les lettres sont explorées visuellement et haptiquement dans l'entraînement HVAM (haptique-visuel-auditif-métaphonologique), visuellement et donc globalement dans l'entraînement VAM (visuel-auditif-métaphonologique), et visuellement mais avec une séquentialité biologique (une main trace une lettre) dans l'entraînement VAM-biologique (visuel-auditif-métaphonologique-biologique). Une amélioration similaire après les trois entraînements est observée dans le test d'identification de lettres et dans les épreuves de conscience phonémique. Mais le nombre de pseudo-mots décodés est plus important après l'entraînement HVAM qu'après les entraînements VAM et VAM-biologique (qui ne diffèrent pas). Ces résultats montrent donc que la perception visuelle d'un mouvement biologique d'écriture ne permet pas d'expliquer les effets bénéfiques de l'ajout de la modalité haptique sur le décodage des enfants et suggèrent que c'est l'exploration visuo-haptique et haptique des lettres qui en est responsable *per se*.

*Correspondance : Dr. Edouard Gentaz, CNRS, Laboratoire de Psychologie et Neurocognition, SHS, Domaine Universitaire, Université Pierre Mendès France, 1251 avenue centrale, BP 47, 38040 Grenoble Cedex 9. E-mail : Edouard.Gentaz@upmf-grenoble.fr

Remerciements. Ce travail a bénéficié du soutien du Centre National de la Recherche Scientifique, de l'Université Pierre Mendès France (Grenoble II) et de l'Université de Savoie. Nous remercions les directeurs, instituteurs et enfants des écoles maternelles Anatole France (Fontaine) et Ampère (Grenoble) pour leur participation à cette étude.

Preparation of young children to read: Effects of visual-haptic exploration of letters and visual perception of writing motions

ABSTRACT

The incorporation of a visuo-haptic and haptic exploration of letters in reading training programs facilitates 5-year-old children's understanding and use of the alphabetic principle. In order to understand the nature of this positive effect, the sequentiality of the exploration was investigated by means of three trainings which also proposed to develop phonemic awareness and letter knowledge. These three trainings differed only on the way the letters were explored. The letters were explored visually and haptically in "HVAM" training (haptic-visual-auditory-metaphonological), only visually thus globally in "VAM" training (visual-auditory-metaphonological), and visually but in a biological sequential way in "VAM-biological" training (visual-auditory-metaphonological-biological). Similar improvements in the phonemic awareness tests and in the letter knowledge test were observed after each intervention. However, the mean number of decoded pseudo-words was higher after HVAM training than after both VAM and VAM-biological training (which did not differ). The present results show that visual perception of writing biological motion can not explain the positive effects of the incorporation of the haptic modality on young children decoding skills. This also suggests that the haptic exploration of letters *per se* was responsible for these improvements.

1. INTRODUCTION

Cette recherche a pour objectif de déterminer ce qui, dans l'exploration visuo-haptique et haptique des lettres incluse dans des entraînements de préparation à la lecture, est responsable des effets bénéfiques observés sur la compréhension et l'utilisation du principe alphabétique chez des enfants en grande section de maternelle (Gentaz, Colé & Bara, 2003 ; Bara, Gentaz, Colé & Sprenger-Charolles, 2004).

De nombreuses recherches ont étudié les facteurs qui permettent de prédire la réussite dans l'acquisition de la lecture avant le début de son apprentissage formel. Ainsi, ces recherches ont mis en évidence que les habilités métaphonémiques ou conscience phonémique (capacité à concevoir que les mots parlés sont constitués d'unités élémentaires, les sons de parole ou phonèmes et à les manipuler intentionnellement) et la connaissance des lettres constituent les meilleurs prédicteurs de la réussite future en lecture (voir par exemple la méta-analyse de 61 études effectuée par Scarborough, 2001). Ces deux capacités permettent de comprendre le principe des écritures alphabétiques, dans lesquelles les sons de parole (ou phonèmes) sont représentés à l'aide de symboles visuels que sont les lettres (ou graphèmes) et d'apprendre les associations graphèmes/phonèmes nécessaires pour décoder les mots écrits via l'utilisation d'une

procédure grapho-phonémique. Cette procédure est considérée comme le socle de la lecture experte car c'est à partir de sa mise en œuvre que la procédure lexicale (qui consiste à identifier les mots écrits directement à partir de l'analyse de leur structure orthographique) peut se développer (voir les travaux de Share, 1999). Ainsi, par exemple, l'étude longitudinale de Sprenger-Charolles, Siegel, Béchennec & Serniclaes (2003) (mais voir aussi Sprenger-Charolles, Colé, Béchennec & Kipffer-Piquard, 2005) montre que, dès le milieu de la première année d'apprentissage de la lecture, les enfants utilisent la procédure de décodage grapho-phonémique et c'est seulement à la fin de cette année que les premiers signes de la mise en œuvre de la procédure lexicale sont observés.

La transparence des orthographes se répercute sur l'utilisation de la procédure de décodage grapho-phonémique. Ainsi l'étude de Seymour, Aro et Erskine (2003), conduite dans 14 pays européens, montre que les enfants qui apprennent dans une orthographe opaque (telle que celle de l'anglais) ont des scores toujours plus faibles en lecture de pseudo-mots (qui témoigne du recours au décodage grapho-phonémique) par rapport aux non anglophones apprenant dans des orthographes plus transparentes (comme celle de l'espagnol ou de l'italien et même du français). Ces résultats suggèrent donc des difficultés de mise en œuvre de la procédure grapho-phonémique. Des recherches inter-langues montrent dans ce sens que celle-ci est utilisée plus précocement dans une orthographe transparente (Defior, Justicia & Marcos, 1994 ; Goswami, Ziegler, Dalton, & Schneider, 2001 ; Sprenger-Charolles, Siegel & Bonnet, 1998) et qu'une orthographe opaque pourrait conduire l'apprenti lecteur à utiliser plus précocement une procédure lexicale (identification directe du mot à partir de son orthographe) ou à la prise en compte d'unités plus larges que les graphèmes tels que les rimes par exemple (Goswami, Gombert & Barrera, 1998 ; voir également pour une revue de questions, Ziegler & Goswami, 2005 ; Sprenger-Charolles, 2004 et Sprenger-Charolles & Colé, sous presse ; Sprenger-Charolles, Colé & Serniclaes, 2006).

La mise en œuvre du décodage grapho-phonémique est donc cruciale pour l'apprentissage de la lecture dans une écriture alphabétique parce qu'elle permet à terme une identification des mots écrits rapide, précise et automatique, indispensable à la compréhension en temps réel de ce qui est lu (Sprenger-Charolles & Colé, 2005). Aux toutes premières étapes de l'apprentissage de la lecture, le décodage grapho-phonémique est dépendant des habilités métaphonémiques et de la connaissance des lettres de l'apprenti lecteur et des études montrent que lorsque celles-ci sont développées dans un même entraînement, les progrès en lecture sont alors les plus importants (Byrne & Fielding-Barnsley, 1989, 1990, 1991 ; Bara *et al.*, 2004).

Dans une première étude, Gentaz *et al.* (2003) ont évalué les effets de deux entraînements qui proposent de façon commune des activités destinées à développer la conscience phonologique ainsi que la connaissance des lettres et des associations graphème/phonème chez des enfants de grande section de maternelle mais qui se distinguent par le type d'exploration qui sous-tend le travail sur l'identité des lettres. Ainsi, l'entraînement dénommé HVAM (Haptique-Visuel-Auditif-Métaphonologique) sollicite les modalités haptique, visuelle et auditive et l'entraînement dénommé VAM (Visuel-Auditif-Métaphonologique) les modalités visuelle et auditive. Plus précisément, le travail sur l'identité des lettres est basé sur une exploration visuo-haptique et haptique séquentielle dans l'entraînement HVAM et sur une exploration visuelle globale dans l'entraînement VAM. On constate une amélioration similaire après les deux entraînements dans les tests de conscience phonologique (test de rimes et d'identification de phonèmes en position initiale et finale dans les mots) et d'identification de lettres. En revanche, on observe une amélioration du décodage de pseudo-mots plus important après l'entraînement HVAM qu'après l'entraînement VAM. L'ensemble de ces résultats suggère donc que l'ajout de la modalité haptique dans ce type d'entraînement amplifie les effets bénéfiques sur la compréhension et l'utilisation du principe alphabétique chez les jeunes enfants, telles que mesurées par la tâche de décodage de pseudo-mots.

Ces résultats peuvent s'expliquer par les différentes spécificités fonctionnelles des modalités sensorielles sollicitées (cf. Hatwell, Streri & Gentaz, 2000). En effet, la séquentialité de l'exploration induite par la modalité haptique pourrait expliquer ces effets bénéfiques : son ajout obligerait l'enfant à traiter les lettres de manière plus séquentielle et donc plus analytique que lorsque les lettres sont présentées visuellement. L'exploration haptique faciliterait alors l'élaboration des connexions entre les représentations orthographiques des lettres, traitées visuellement, et les représentations phonologiques des sons correspondants, traités auditivement. Ces résultats peuvent également s'expliquer par la composante motrice inhérente à la modalité haptique.

Dans une seconde étude, Bara *et al.* (2004) ont donc tenté de déterminer si les effets bénéfiques observés après l'entraînement HVAM pouvaient s'expliquer par la séquentialité de l'exploration des lettres elle-même (indépendamment des modalités sensorielles sollicitées) ou par l'exploration visuo-haptique et haptique *per se*. Trois entraînements, se différenciant par les modalités sensorielles sollicitées (visuelle, auditive et haptique) et par la manière d'explorer les lettres (séquentiellement ou globalement) ont ainsi été comparés. Les entraînements HVAM (incluant

une exploration haptique et visuo-haptique séquentielle des lettres) et VAM (incluant une exploration visuelle globale des lettres) utilisés par Gentaz *et al.* (2003) ont été proposés aux enfants. Un nouvel entraînement dénommé VAM-séquentiel a été introduit dans lequel les lettres sont présentées visuellement mais de manière séquentielle. Plus précisément, les lettres sont présentées aux enfants sur un écran d'ordinateur et s'inscrivent progressivement et à vitesse constante. Pour évaluer le rôle de la séquentialité indépendamment des modalités sensorielles sollicitées, l'ordre d'exploration des lettres correspondant au sens de l'écriture est imposé dans les entraînements HVAM et VAM-séquentiel alors qu'il est global et sans ordre fixe dans l'entraînement VAM. Par ailleurs, la modalité haptique induit une exploration de lettre active et intentionnelle via la motricité (entraînement HVAM) alors que la modalité visuelle induit une exploration moins contrôlée cognitivement et davantage passive dans les entraînements VAM-séquentiel et VAM. Cette comparaison permet ainsi d'évaluer le rôle de l'exploration haptique *per se*.

Les résultats révèlent une amélioration similaire après les trois entraînements dans les trois tests de conscience phonologique et de connaissance de lettres et confirment ainsi les résultats observés dans l'étude précédente (Gentaz *et al.*, 2003). Bien que le nombre moyen de pseudo-mots décodés augmente significativement pour les trois types d'interventions, il reste néanmoins plus important après l'entraînement HVAM qu'après les entraînements VAM-séquentiel et VAM (qui ne diffèrent pas significativement). Ces résultats suggèrent donc que ce n'est pas l'exploration séquentielle des lettres indépendamment des modalités sensorielles qui explique l'amélioration des performances en décodage mais l'exploration visuo-haptique et haptique *per se*.

Cependant, une autre explication de l'absence d'effet de la condition VAM-séquentiel peut être proposée : elle considère que dans cet entraînement les lettres s'inscrivent à l'écran à vitesse constante, ce qui ne correspond pas à un mouvement « naturel » d'écriture. Or, nous savons que les mouvements humains d'écriture obéissent à des lois de production motrice telle que la loi de puissance $2/3$ qui définit les liens existants entre la vitesse du mouvement et la courbure de sa trajectoire (Lacquaniti, Terzuolo & Viviani, 1983). Ainsi, lors de la production d'une lettre (le *l* par exemple), la vitesse de traçage a tendance à augmenter lorsque le rayon de courbure diminue et lorsque celle-ci augmente. D'après les « théories motrices de la perception visuelle » inspirées de la théorie motrice de la perception de la parole (Lieberman & Mattingly, 1985), les processus perceptifs seraient influencés et guidés par la connaissance que les sujets ont des règles de fonctionnement de leurs propres mouvements

(pour une revue, voir Viviani, 2002). Les informations temporelles et plus particulièrement l'organisation cinématique du mouvement joueraient un rôle décisif. Ces informations seraient à l'origine non seulement de l'identification des mouvements mais également de la prédiction de l'identité de mouvements pas encore réalisés. En ce qui concerne l'identification des mouvements, lorsque la forme de la trajectoire et son profil de vitesse ne respectent pas les lois de production des mouvements humains, des phénomènes d'illusions perceptives apparaissent. Ainsi, un spot lumineux sur un écran, décrivant la trajectoire d'un cercle mais ayant le profil de vitesse d'une ellipse est perçu comme une ellipse. Ces résultats montrent que la cinématique du mouvement a une influence directe sur la perception de la forme (Viviani et Stucchi, 1989, 1992). Néanmoins, ce type de recherche a été mené uniquement auprès d'adultes. En ce qui concerne la prédiction de l'identité de mouvements d'écriture, Orliaguet, Kandel et Boë (1997) ont montré l'importance des informations cinématiques (e.g. accélération, décélération) par rapport aux informations spatiales (e.g. la forme). Ainsi, les adultes prédisent mieux l'identité de la lettre (e ou *é*) qui suit la lettre l lorsqu'ils disposent des informations cinématiques biologiques que lorsqu'ils disposent uniquement des informations spatiales (Kandel, Orliaguet & Viviani, 2000).

Si les informations cinématiques d'un mouvement d'écriture d'une lettre jouent un rôle dans son identification visuelle, on peut alors faire l'hypothèse que le non-respect de la cinématique biologique des lettres dans l'entraînement VAM-séquentiel pourrait être responsable de l'absence d'effet observé par Bara *et al.* (2004). Le premier objectif de la recherche est donc de répondre à cette question en proposant un entraînement qui respecte les mouvements biologiques des lettres et que nous appellerons VAM-biologique. Dans ce but, nous avons repris et amélioré l'entraînement VAM-séquentiel de Bara *et al.* (2004) de manière à ce que les lettres se dessinent en accord avec l'ensemble des caractéristiques des mouvements biologiques. Plus précisément, la mise en place de cet entraînement nous permettra de recueillir des données plus précises concernant l'effet de la séquentialité de l'exploration et de déterminer (notre 2^e objectif) si les effets positifs observés après l'entraînement HVAM sur le décodage peuvent être expliqués par l'exploration séquentielle des lettres indépendamment des modalités perceptives impliquées ou par l'exploration haptique *per se*. Ainsi, si le travail d'exploration séquentielle est responsable des améliorations en décodage, nous devrions observer des performances de décodage similaires dans le groupe VAM-biologique et dans le groupe HVAM et des performances inférieures dans le groupe VAM. En revanche, si l'exploration haptique est responsable en elle-même des améliorations,

alors les performances en décodage devraient être meilleures dans le groupe HVAM que dans les deux autres groupes (qui ne devraient pas différer). Enfin, pour les tests d'identification de lettres et de phonèmes, quelle que soit l'hypothèse testée, nous nous attendons, comme dans nos études précédentes (Bara *et al.*, 2004 ; Gentaz *et al.*, 2003) à observer une amélioration similaire des performances après les trois entraînements.

2. MÉTHODE

2.1. Participants

Trente trois enfants (15 filles et 18 garçons) d'âge moyen 5 ans et 7 mois (de 5 ans et 2 mois à 6 ans et 1 mois) ont participé à cette recherche. Seuls les enfants qui ont participé à toutes les séances d'entraînement ont été pris en compte pour l'analyse des résultats (9 enfants ont été retirés de l'échantillon de départ). Ces enfants sont scolarisés dans deux classes de grande section de maternelle d'écoles différentes de Grenoble. Tous les enfants appartiennent à des milieux socio-économiques moyens. Dans chaque classe, les enfants des trois groupes d'entraînements ont été appariés le plus strictement possible sur les caractéristiques suivantes : âge, capacités métaphonémiques, niveau de vocabulaire (EVIP), niveau de performance non verbale (carrés du WPPSI), connaissance des lettres de l'alphabet et décodage de pseudo-mots. Des tests *t* de *Student* visant à vérifier la répartition équivalente des sujets entre les groupes ont été effectués. Les valeurs *t* ainsi obtenues se sont révélées non significatives pour chacun des critères. Les résultats des prétests sont reportés dans le tableau I.

Tableau I. Caractéristiques des enfants avant les entraînements dans chacun des groupes moyennes et écart-types (entre parenthèses).

Table I. Characteristics of the children in each group before the interventions means and standard deviations (in parenthesis).

Entraînement	Âge moyen (mois)	EVIP	Carré du WPPSI	Identification de lettres (/26)
HVAM	64	64,54 (11,76)	26,72 (4,81)	13,00 (5,67)
VAM-biologique	64	62,9 (11,73)	25,45 (4,37)	11,27 (5,76)
VAM	65	64,45 (9,94)	27,27 (5,56)	8,36 (7,51)

2.2. Matériel et procédure

Les séances d'entraînement portent sur sept phonèmes choisis en fonction de leur fréquence d'apparition dans la langue française (Rondal, 1997). Ainsi, les phonèmes choisis (/a/, /i/, /r/, /l/, /t/, /p/) comptent parmi les 11 plus fréquents de la langue française avec néanmoins une exception (/b/). Nous avons également choisi de travailler des correspondances graphème/phonème qui sont extrêmement régulières. Ce choix a été effectué afin de faciliter le travail des enfants. Les sessions d'entraînement débutent par l'étude des phonèmes associés aux graphèmes « a », et « i » et qui correspondent aux voyelles les plus fréquentes en français (en fait les deux phonèmes les plus fréquents de la langue française) mais également à des sons plus facilement identifiables perceptivement que les consonnes. Puis les séances se poursuivent avec les phonèmes /r/ et /l/ qui renvoient aux deux consonnes les plus fréquentes de la langue française et continuent avec les phonèmes correspondants aux lettres « t » et « p » et se terminent avec /b/. Le choix de travailler la correspondance grapho-phonémique « b » se motive par le fait qu'il s'agit d'une correspondance difficile et, ce pour deux raisons au moins. D'une part, la lettre « b » peut se confondre visuellement par rotation avec les lettres « p » et « d », et d'autre part, par rapport, aux autres phonèmes étudiés, le phonème /b/ : est la seule consonne occlusive non voisée, difficilement prononçable et identifiable en isolat.

2.2.1. Prétests et post-tests

Les capacités métaphonémiques, le niveau de connaissance des lettres et le niveau de décodage sont évalués chez les enfants de manière individuelle une à deux semaines avant et après les entraînements. Les capacités métaphonémiques sont testées à l'aide de deux tests d'identification de phonèmes en position initiale et finale dans les mots. Pour chacun de ces tests, des images en noir et blanc représentant des mots familiers et faciles à identifier sont présentées (une description détaillée du matériel est fournie en annexe 1). Chaque test est précédé de trois essais avec feedback afin de s'assurer que les enfants ont bien compris la consigne. *Test d'identification de phonèmes en position initiale*: Quatre images sont présentées à l'enfant. À chaque essai l'expérimentateur montre une première image, la pose sur la table et énonce le mot qu'elle représente. Ce premier mot est utilisé par l'enfant pour trouver parmi les trois autres images, celle qui correspond au mot qui commence par le même son. Par exemple : « haricot » est le premier mot et l'enfant doit choisir parmi « éléphant, avion, télévision ». Les différents essais portent sur chacun des phonèmes faisant l'objet des entraînements. À chaque essai la position de l'item cible est contrôlée afin d'éviter la mise en place de stratégies de réponse basées sur l'ordre de présentation des images. Un point par bonne réponse est attribué (note sur 7).

Test d'identification de phonèmes en position finale: Le même principe est utilisé à la différence que l'enfant doit retrouver le mot qui finit par le même son que le mot présenté en premier. Par exemple l'expérimentateur présente le mot « colombe » et l'enfant doit choisir parmi les mots « tigre, vélo, herbe ». On attribue un point par bonne réponse (note sur 7).

Test d'identification des lettres de l'alphabet: L'expérimentateur énonce le nom des lettres une par une de façon aléatoire et l'enfant doit indiquer sur des planches, représentant cinq lettres écrites en caractère cursif dans un ordre différent de celui de l'alphabet, la lettre qu'il a entendue (le but étant de réduire le nombre d'erreurs dues à une recherche trop étendue de la lettre parmi 26). Chaque bonne réponse est notée un point. En prétest les 26 lettres de l'alphabet sont testées alors qu'en post-test, seules les 7 lettres faisant l'objet de l'entraînement sont testées (note sur 7). L'objectif du pré-test sur les 26 lettres était d'obtenir une mesure générale des connaissances des lettres de l'alphabet des enfants.

Test de décodage de pseudo-mots: Les pseudo-mots sont composés uniquement des lettres étudiées pendant les entraînements. Il est précisé aux enfants que les mots sont inventés. Trois des douze pseudo-mots présentés sont composés de deux lettres (par exemple « ba »), six de trois lettres (par exemple « ila ») et trois de quatre lettres (par exemple « tiba »). On attribue un point pour chaque pseudo-mot lu correctement (note sur 12).

2.2.2. Les entraînements

Trois groupes équivalents de 11 enfants ont été constitués en fonction de leur âge et des résultats obtenus aux prétests dans les épreuves suivantes : tests d'habilités métaphonémiques, niveau de vocabulaire (EVIP), niveau de performance non verbale (carrés du WPPSI), connaissance des lettres de l'alphabet et décodage de pseudo-mots. Un entraînement spécifique est administré à chacun des groupes par le même expérimentateur : HVAM, VAM-biologique ou VAM. Chaque entraînement est composé de huit séances, une séance hebdomadaire pour chaque lettre et une séance de révision finale. Une lettre et un son sont étudiés de la même façon à chaque séance (mêmes activités dans le même ordre). Les phonèmes étudiés sont présentés des plus fréquents aux moins fréquents dans la langue française : le /a/ lors de la première séance, puis le /i/, le /r/, le /l/, le /t/, le /p/ et enfin le /b/. Les séances d'entraînement durent approximativement 25 minutes et se déroulent à l'école dans des salles isolées du bruit. Les enfants sont assis par petits groupes de 5 à 6 autour d'une table ronde, face à l'expérimentateur, de manière à favoriser les interactions. L'expérimentateur veille à solliciter chacun des enfants lors des différentes activités. Chaque entraînement inclut les mêmes activités métaphonémiques : comptine, posters et jeux de cartes (voir annexe 2 pour une description détaillée du matériel). La différence concerne les différentes modalités sensorielles sollicitées et la manière d'explorer les lettres.

2.2.2.1. L'entraînement HVAM

La comptine et l'activité d'identification des lettres: Chaque séance débute par la lecture de la comptine qui contient un grand nombre de fois le son correspondant à la lettre étudiée. Le but est de sensibiliser l'enfant au son à l'aide de petites histoires amusantes, faciles à se rappeler et à répéter. L'expérimentateur lit la comptine et demande aux enfants de repérer le son qui revient le plus souvent et sur lequel portera la séance. Si aucun enfant ne parvient à identifier le son cible, l'expérimentateur le leur dévoile. Les enfants répètent alors chaque phrase après leur énonciation pour se familiariser avec le son étudié. Pour favoriser l'apprentissage

des associations graphème/phonème, une petite lettre mobile est distribuée à chaque enfant, après la comptine. Il s'agit de petites lettres en plastique que les enfants peuvent manipuler librement et qu'ils gardent en main pendant les activités sur les posters. Les lettres *a* et *r* mesurent 2,3 cm de haut, la lettre *i*, 3 cm et les lettres *l*, *t*, *p* et *b*, 4,5 cm.

Les posters : Les enfants travaillent ensuite sur deux panneaux de 50 x 65 cm sur lesquels sont collées six images de 20 x 15 cm. Le premier panneau est composé de trois images qui correspondent aux mots commençant par le son cible et de trois images correspondant aux mots distracteurs. L'expérimentateur place ce premier poster face aux enfants et énonce le nom de chacune des images en veillant à ne pas prononcer l'article devant le mot afin d'éviter toute confusion. Chaque enfant doit trouver les mots commençant par le son étudié pendant la séance et venir les chuchoter à l'oreille de l'expérimentateur, pour que tous les enfants puissent participer. Lorsque chaque enfant a trouvé au moins un mot, les réponses sont révélées au groupe et discutées avec les enfants afin de déterminer si elles sont correctes ou non. L'expérimentateur installe ensuite le poster comprenant les images qui correspondent aux mots finissant par le son cible et répète le même protocole.

Les activités visuo-haptique et haptique d'exploration des lettres : Des grandes lettres en mousse de couleur, collées sur un support en carton plume (20 x 27 cm) sont ensuite distribuées à chacun des enfants et fixées sur la table face à eux. Les lettres *a* et *r* mesurent 5,5 cm de haut, la lettre *i* 8 cm et les lettres *l*, *t*, *p*, et *b* 11 cm. Les enfants doivent dans un premier temps explorer la lettre librement avec leurs doigts puis on leur demande de suivre avec leur index le sens de l'écriture (figure 1). L'exploration tactile est réalisée par chaque enfant deux ou trois fois les yeux ouverts puis les yeux fermés. L'expérimentateur observe et contrôle la manière dont chaque enfant explore la lettre. La même activité est ensuite réalisée avec les petites lettres. Il s'agit de petites lettres en plastique identiques aux lettres mobiles collées sur une plaque de carton plume de 10 x 11 cm. Deux tailles de lettres sont utilisées afin de faciliter l'apprentissage et l'exploration des lettres. En effet, les mouvements d'amplitude moyenne impliquant le système main-bras-épaule sont plus faciles à contrôler avec précision que les mouvements de faible amplitude (Hatwell *et al.*, 2000). Les grandes lettres, qui induisent des mouvements d'amplitude moyenne, aident les enfants à réussir la tâche de poursuite visuo-manuelle et leur fournissent en plus de la manière d'explorer les lettres, des indices proprioceptifs pour coder les orientations spatiales. Ceci facilite alors l'exploration des petites lettres qui nécessitent des mouvements de faible amplitude. Une fois l'exploration haptique terminée, une tâche de reconnaissance tactile de la petite lettre est proposée. Un cache à deux ouvertures (une première pour que l'enfant glisse ses mains et une seconde pour que l'expérimentateur puisse observer les mouvements exploratoires) est positionné sur la lettre à laquelle est ajoutée une seconde lettre qui lui ressemble graphiquement. Les enfants doivent alors explorer les deux lettres sans contrôle visuel et discriminer la lettre étudiée de la lettre distractive. La lettre *a* est associée à la lettre distractive *e*, le *i* au *u*, le *r* au *n*, le *l* au *k*, le *t* au *b*, le *p* au *q* et le *b* au *l*. S'ils ne parviennent pas à identifier correctement la lettre, l'expérimentateur leur suggère de prendre davantage de temps pour explorer les lettres.

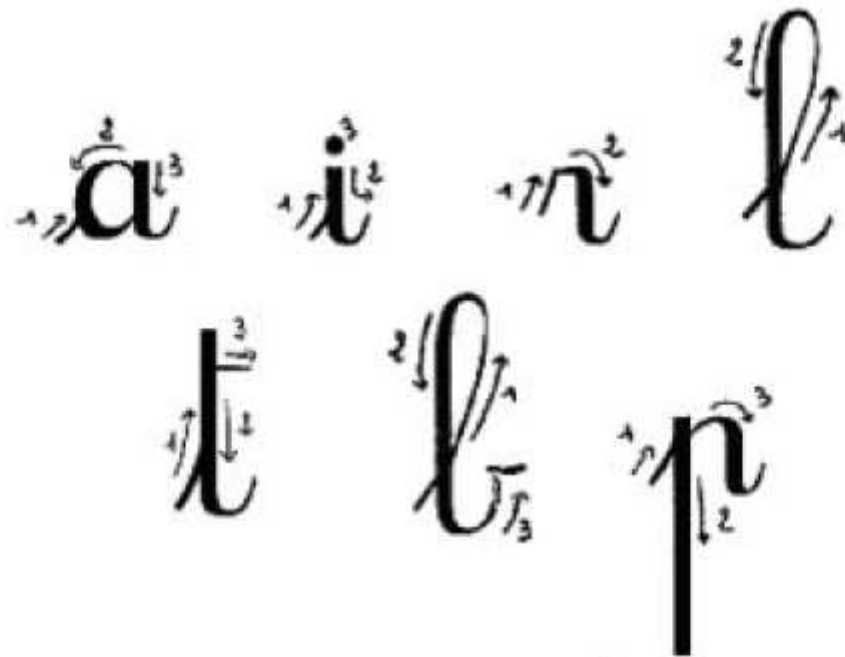


Figure 1. Typographie de chaque lettre. Les flèches numérotées indiquent l'ordre d'exploration des lettres.

Figure 1. The typography of each letter. The numbers inscribed above the arrows indicated the order exploration of letters.

Les jeux de cartes : la séance se termine par deux jeux de cartes. Les jeux sont composés d'images représentant six mots cibles qui débutent ou se terminent par le son étudié ainsi que deux mots distracteurs. Les cartes sont disposées sur la table, face visible, et l'expérimentateur énonce le nom de chacun des mots représentés. Les enfants choisissent alors, chacun à leur tour, une carte représentant un mot qui débute par le son étudié pour le premier jeu ou qui finit par le son cible pour le second. Si un enfant se trompe, le choix est discuté en groupe et après des explications, l'enfant qui a fait l'erreur peut piocher une nouvelle carte. Le jeu se termine lorsqu'il ne reste plus de cartes cibles disponibles.

2.2.2.2. L'entraînement VAM

La comptine et l'activité d'identification des lettres : la comptine est la même que celle présentée dans l'entraînement HVAM. Après la comptine, l'expérimentateur distribue à chaque enfant une carte d'exploration visuelle et leur montre l'orientation correcte de la lettre. Chaque lettre est imprimée sur un morceau de papier collé sur une petite carte. La taille des lettres est la même que pour l'activité d'identification dans l'entraînement HVAM. L'expérimentateur demande aux enfants de suivre des yeux le tracé de la lettre et de se concentrer sur la forme, les

lignes et les courbures de celle-ci. Les cartes représentant la lettre cursive à apprendre restent visibles pendant l'activité suivante (posters).

Les posters : les deux posters présentés sont identiques à ceux de l'entraînement HVAM.

Les activités visuelles d'exploration des lettres : Les enfants réalisent une tâche de reconnaissance visuelle sous la forme d'un jeu de barrage où ils doivent cocher la lettre étudiée. Une feuille (format A4) sur laquelle sont imprimées quatre lignes de onze lettres cibles et lettres distractrices (qui partagent des caractéristiques physiques avec la lettre cible) est distribuée aux enfants. Chaque ligne de lettres contient trois types de lettres distractrices (dans le but d'augmenter la difficulté de l'activité, l'utilisation d'une seule lettre distractrice rendant la tâche de discrimination visuelle trop facile et rapide) et un nombre variable de lettres cibles (afin d'éviter l'utilisation de stratégies basées sur le nombre d'item à barrer). Nous avons utilisé 17 exemplaires de la lettre cible et 9 exemplaires de chaque lettre distractrice. La lettre cible *a* est associée aux lettres distractrices *c*, *e* et *x* ; la lettre *i* aux lettres *o*, *u* et *v* ; la lettre *r* aux lettres *m*, *n* et *s* ; la lettre *t* aux lettres *b*, *d* et *k* ; la lettre *l* aux lettres *d*, *k* et *t* ; la lettre *p* aux lettres *g*, *j* et *q* et la lettre *h* aux lettres *h*, *k* et *l*.

Le jeu de pioche : Afin de rendre équivalent la durée et le nombre d'activités entre les entraînements, un jeu de carte supplémentaire est proposé. Les cartes sont disposées face cachée sur la table et les enfants en piochent une chacun à leur tour. Chaque jeu est composé de 16 cartes de 7 x 5 cm représentant la lettre cible en quatre exemplaires (deux rouges et deux noires) et trois types de lettres distractrices en quatre exemplaires chacune (deux rouges et deux noires). Les lettres distractrices associées aux lettres cibles sont les mêmes que celles utilisées pour le jeu de barrage. Les enfants doivent juger si la lettre qu'ils ont piochée correspond à la lettre étudiée ou à une lettre distractrice, en la mettant dans une des deux boîtes placées face à eux (soit celle de la lettre cible, soit celle des lettres distractrices). Lorsqu'un enfant fait une erreur, l'avis des autres enfants est demandé et après des explications, il peut piocher une autre lettre.

Les jeux de carte : Les deux jeux de cartes sont les mêmes que dans l'entraînement HVAM.

2.2.2.3. L'entraînement VAM-biologique

Le matériel et le déroulement de la séance sont les mêmes que pour l'entraînement VAM mais la lettre bien que présentée visuellement l'est de manière séquentielle. La lettre est tracée séquentiellement sur un écran d'ordinateur (en noir sur fond blanc). Il s'agit d'un enregistrement vidéo d'un véritable mouvement d'écriture. Les instantanés pris par la caméra préservent ainsi les caractéristiques spatiales et temporelles du mouvement biologique filmé. Une fois la lettre entièrement dessinée par un acteur, elle reste immobile et visible à l'écran pendant 2 secondes puis disparaît durant 25 millisecondes et recommence à se dessiner (figure 2). La taille des lettres à l'écran est de 4,5 cm pour le *a*, le *i* et le *r*, de 9,5 cm pour le *b*, le *l* et le *p* et de 9 cm pour la lettre *t*. Les temps (en secondes) mis pour dessiner chaque lettre est : pour le *a* : 7 s., pour le *i* : 6 s., pour le *r* : 5,25 s., pour le *b* : 7,45 s., pour le *l* : 5,75 s., pour le *p* : 8 s. et pour le *t* : 7,5 s. L'expérimentateur demande aux enfants de suivre des yeux le tracé de la lettre et de porter leur attention sur la forme, les lignes et les courbures de celle-ci.



Figure 2. Extraits du film présentant au cours d'une séance de l'entraînement VAM-biologique l'écriture naturel d'un « l ».

Figure 2. Example of drawn letter with biological movement on a computer screen

2.2.2.4 La séance de révision

À l'issue des sept séances d'entraînements les enfants participent à une séance de révision. La séance débute par rappel des sept lettres étudiées et des sept sons correspondants. Les enfants effectuent une exploration visuelle, visuelle séquentielle ou haptique des lettres qui dépend du type d'entraînement suivi. Dans l'entraînement HVAM les enfants doivent suivre les contours de chacune des lettres en mousse avec les doigts, yeux ouverts puis yeux fermés. Dans l'entraînement VAM les enfants explorent visuellement chaque lettre. Enfin, dans l'entraînement VAM-biologique les enfants regardent chacune des lettres se dessiner progressivement sur l'écran. La séance se poursuit par un jeu de dominos (voir la présentation du matériel en annexe 3). Les dominos sont composés de deux images placées côte à côte. Toutes les images représentent des mots qui commencent ou finissent par les sept sons étudiés pendant les entraînements. Deux jeux de dominos sont proposés, le premier correspondant aux mots qui commencent par un des sons étudiés et le second aux mots qui finissent par un de ces sons. Les dominos sont disposés, en deux fois (afin de faciliter la recherche et la mémorisation des mots), face visible sur la table et chaque image est nommée. L'expérimentateur pose le premier domino et les enfants doivent, chacun à leur tour, attacher un nouveau domino afin que les images juxtaposées commencent ou finissent par le même son. Cet entraînement métaphonologique permet de réactiver mais également de vérifier les connaissances des enfants sur les différents sons appris pendant les entraînements.

4. RÉSULTATS

4.1. Décodage de pseudo-mots

Le nombre moyen de pseudo-mots (et les écart-types) correctement décodés par les enfants avant et après les entraînements est présenté dans le tableau II.

Une ANCOVA 3 (entraînement) x 2 (période) sur le nombre de pseudo-mots correctement décodés a été réalisée, avec comme covariants les performances aux prétests de vocabulaire, des carrés du WPPSI, de connaissance de lettres et aux deux tests métaphonémiques. Cette analyse révèle un effet principal significatif de la période $F(1,30) = 32,64$, $p < .01$: les enfants décodent davantage de pseudo-mots après les entraînements ($M = 3,06$) qu'avant ($M = 0,57$). L'effet principal du type d'entraînement est significatif $F(2,25) = 4,82$, $p < .05$ de même que l'interaction (entraînement x période) $F(2,30) = 5,85$, $p < .01$.

Rappelons que les hypothèses alternatives concernant l'amélioration des performances en décodage de pseudo-mots après l'entraînement HVAM sont les suivantes : si le travail d'exploration séquentielle est responsable des améliorations en décodage, nous devrions observer des performances de décodage similaires dans le groupe VAM-biologique et dans le groupe HVAM et des performances inférieures dans le groupe VAM. En revanche, si l'exploration haptique est responsable en elle-même des améliorations, alors les performances en décodage devraient être meilleures dans le groupe HVAM que dans les deux autres groupes (qui ne devraient pas différer). Afin de tester ces hypothèses alternatives, nous avons effectué les comparaisons planifiées suivantes : respectivement, $HVAM > VAM$ -biologique = VAM et $HVAM = VAM$ -biologique $> VAM$. Les deux contrastes n'étant pas orthogonaux, nous avons appliqué une correction de seuil de Boole-Bonferroni ($\alpha = .25$). La première comparaison est significative $F(1,24) = 8,79$, $p < .01$ et son résidu se révèle non significatif $F(1,24) = 0,49$, ns, $MSe = 4,47$. Enfin, la deuxième comparaison $F(1,24) = 3,77$, ns, n'est pas significative et son résidu significatif $F(1,24) = 6,18$, $p < .05$, $MSe = 4,47$. Le nombre de pseudo-mots correctement décodés est donc significativement plus élevé après l'entraînement HVAM ($M = 5,54$) qu'après l'entraînement VAM-biologique ($M = 2,27$) et VAM ($M = 1,36$), qui ne diffèrent pas significativement entre eux.

Tableau II. Nombre moyen (et écart-types) de pseudo-mots correctement décodés (max. 12) avant et après chaque entraînement.

Table II. Mean number (and standard deviations) of decoded pseudo-words (max. 12) before and after each intervention.

Entraînement	Pré-test	Post-test
HVAM	1,00 (1,48)	5,54 (3,88)
VAM-biologique	0,45 (0,69)	2,27 (3,20)
VAM	0,27 (0,65)	1,36 (1,63)

4.2. Identification des sept lettres cibles

Le tableau III présente le nombre moyen (et les écart-types) de lettres cibles identifiées par les enfants avant et après les entraînements.

Une ANCOVA 3 (entraînement) x 2 (période) sur le nombre de lettres cibles identifiées a été réalisée, avec comme covariants les performances aux prétests en vocabulaire (EVIP), carrés du WPPSI, tests métaphonémiques et décodage de pseudo-mots. Cette analyse révèle un effet principal de la période significatif $F(1,30) = 83,85$, $p < .01$: les enfants identifient davantage de lettres après les entraînements ($M = 4,69$) qu'avant ceux-ci ($M = 2,78$). L'effet principal du type d'entraînement $F(2,25) = 0,86$, ns. et l'interaction (entraînement x période) $F(2,30) = 1,31$, ns. ne sont pas significatifs.

Tableau III. Nombre moyen (et écart-types) de lettres reconnues (max. 7) avant et après chaque entraînement.

Table III. Mean number (and standard deviations) of recognized letters (max. 7) before and after each intervention.

Entraînement	Prétest	Post-test
HVAM	3,27 (1,19)	4,60 (1,74)
VAM-biologique	2,90 (1,13)	5,00 (1,41)
VAM	2,18 (1,94)	4,48 (2,36)

4.3. Capacités métaphonémiques

Le nombre moyen de bonnes réponses (et écart-types) aux deux tests métaphonémiques avant et après les entraînements sont représentés dans les tableaux IV.

4.3.1. Test d'identification de phonèmes en position initiale dans les mots

Une ANCOVA 3 (entraînement) x 2 (période) sur le nombre de bonnes réponses au test d'identification de phonème en position initiale a été réalisée, avec comme covariants les performances aux prétests en vocabulaire (EVIP), carrés du WPPSI, connaissance de lettres et décodage de pseudo-mots. Cette analyse révèle un effet principal significatif de la période $F(1,30) = 47,95$, $p < .01$: les performances des enfants sont

supérieures après les entraînements ($M = 5,75$) qu'avant ceux-ci ($M = 3,90$). L'effet principal du type d'entraînement $F(2,25) = 0,58$, ns. et l'interaction (entraînement x période) $F(2,30) = 0,36$, ns. ne sont pas significatifs.

4.3.2. Test d'identification de phonèmes en position finale dans les mots

Une ANCOVA 3 (entraînement) x 2 (période) sur le nombre de bonnes réponses au test d'identification de phonème en position finale a été réalisée, avec comme covariants les performances aux prétests en vocabulaire (EVIP), carrés du WPPSI, connaissance de lettres et décodage de pseudo-mots. Cette analyse révèle un effet principal significatif de la période $F(1,30) = 77,96$, $p < .01$: les performances des enfants sont supérieures après les entraînements ($M = 4,99$) qu'avant ceux-ci ($M = 3,33$). L'effet principal du type d'entraînement $F(2,25) = 1,12$, ns. n'est pas significatif mais l'interaction (entraînement x période) est significative $F(2,30) = 3,43$, $p < .05$. Les tests post-hoc de Newmans-keuls montrent, curieusement (et de façon difficilement interprétable), que les enfants qui ont suivi l'entraînement VAM-biologique améliorent davantage leurs performances entre le pré-test et le post-test que ceux qui ont suivi les entraînements HVAM et VAM ($p < .01$).

Tableau IV. Scores moyens et (écart-types) dans les deux tests métaphonémiques avant et après chaque entraînement.

Table IV. Mean scores (and standard deviations) obtained in the two metaphonemic tests before and after each intervention.

Test x Entraînement	Pré-test	Post-test
Phonème initial (max.7)		
HVAM	3,90 (2,17)	6,00 (1,00)
VAM-biologique	3,45 (1,44)	5,36 (1,03)
VAM	4,36 (1,80)	5,90 (1,22)
Phonème final (max.7)		
HVAM	3,54 (1,04)	5,72 (1,10)
VAM-biologique	2,72 (1,56)	4,54 (1,37)
VAM	3,72 (1,42)	4,72 (1,62)

5. DISCUSSION

L'objectif de cette recherche était de comprendre plus précisément le rôle de la séquentialité de l'exploration des lettres dans l'amélioration des performances en décodage obtenues consécutivement à un entraînement sollicitant l'exploration haptique de lettres en relief. Pour répondre à cette question, nous avons comparé trois entraînements de préparation à la lecture : HVAM, VAM et VAM-biologique auprès d'enfants en grande section de maternelle. Ces entraînements développent de façon commune les capacités métaphonémiques des enfants mais diffèrent par les modalités sensorielles sollicitées (visuelle, auditive et haptique) ainsi que par la manière d'explorer les lettres (simultanée ou séquentielle). Pour l'entraînement VAM-biologique les lettres se dessinaient selon un mouvement biologique d'écriture. Nous avons mesuré les performances des enfants avant et après chaque type d'entraînement en utilisant deux tests mesurant les capacités métaphonémiques (les tests d'identification de phonèmes en position initiale et finale), un test de connaissance de lettres et enfin un test décodage de pseudo-mots.

Nous avons observé un progrès des performances pour tous les tests administrés après chaque entraînement. Ces résultats sont en accord avec les études précédentes qui montrent que les programmes qui développent à la fois les habiletés d'analyse phonémique et la connaissance des lettres et des correspondances graphème/phonème favorisent la compréhension et l'utilisation du principe alphabétique nécessaire au décodage des mots écrits (Bus & Van Ijzendoorn, 1999 ; Castles & Coltheart, 2004 ; Ehri *et al.*, 2001). Cependant, l'amplitude des progrès dépend du type d'entraînement, c'est-à-dire du type de modalité sollicitée et de la manière d'explorer les lettres, mais également du type de connaissances évaluées. Ainsi, nous avons observé un progrès des performances similaires après les trois entraînements pour les tests métaphonémiques et le test d'identification de lettres mais plus important pour le test de décodage de pseudo-mots après l'entraînement HVAM qu'après les entraînements VAM et VAM-biologique.

Plus précisément, les tests d'identification de phonèmes en position initiale et finale permettent de mesurer les capacités métaphonémiques acquises par les enfants au cours des sessions d'entraînement. Les résultats confirment nos hypothèses. Les trois types d'entraînements ont permis une augmentation similaire des performances entre les prétests et les post-tests pour les tests métaphonémiques (à une exception près et qui est difficilement interprétable). Ce résultat s'explique par le fait que les activités proposées sont les mêmes quel que soit l'entraînement suivi par les

enfants. Après les trois interventions, les enfants ont donc atteint un certain niveau d'habilités métaphonémiques.

Le test de décodage de pseudo-mots permet une évaluation du niveau de compréhension du principe alphabétique et de son utilisation. En effet, la réussite à ce test requiert l'application des correspondances graphème/phonème travaillées au cours des différentes sessions d'entraînement. À l'inverse, un échec à cette épreuve suggère une difficulté à utiliser ce principe alphabétique mais ne préjuge pas du niveau de compréhension de ce principe. On constate que les performances des enfants ont significativement augmenté entre les prétests et les post-tests pour chaque entraînement. Cependant, l'entraînement HVAM donne lieu à de meilleures performances que l'entraînement VAM. Ce résultat montre, comme le suggèrent Bara *et al.* (2004) et Gentaz *et al.* (2003), que l'exploration visuo-haptique et haptique des lettres serait plus efficace qu'une simple exploration visuelle pour comprendre et utiliser le principe alphabétique et par conséquent pour développer des habiletés de décodage chez les enfants. Cette interprétation générale découle indirectement des études qui montrent que les compétences métaphonémiques et la connaissance des lettres, en grande section de maternelle, constituent les meilleurs facteurs prédictifs de la réussite en lecture un an plus tard soit au cours de la première année de lecture (voir par exemple, Muter, Hulme, Snowling & Taylor, 1998). C'est au cours de cette année que l'on considère généralement que les habiletés de décodage des mots écrits se développent parmi lesquelles la procédure de décodage grapho-phonémique (voir par exemple, Sprenger-Charolles *et al.* 2003, 2005).

Le résultat original de cette expérience réside dans les performances observées après l'entraînement HVAM : elles se révèlent supérieures à celles observées après l'entraînement VAM-biologique (qui ne diffère pas significativement de l'entraînement VAM). On constate que l'exploration visuelle séquentielle des lettres ne permet pas d'obtenir les mêmes effets bénéfiques que l'exploration haptique séquentielle même lorsque les lettres se dessinent en respectant les lois de production motrice. Le fait qu'on obtienne des résultats similaires consécutivement à la perception d'un mouvement conforme ou non aux règles de production motrice pourrait s'expliquer par l'hypothèse selon laquelle la perception visuelle des mouvements dépendrait des capacités motrices des sujets et/ou de leur expérience visuelle. En effet, les enfants de 5 ans bénéficient d'une expérience visuelle des mouvements d'écriture réduite et n'ont pas encore acquis un geste d'écriture qui suit les mêmes lois motrices que l'adulte (cf. Bara, Gentaz & Colé, 2006). Il est donc probable que les enfants ne tiennent pas compte dans nos entraînements des informations contenues dans la cinématique

du mouvement et s'appuient davantage sur la forme visuelle du tracé de la lettre. Cette interprétation est corroborée par des résultats récents qui montrent que les enfants de 7 ans ne sont pas capables de tirer parti de l'information contenue dans la cinématique de la première lettre pour prévoir l'identité de la lettre qui suit (Louis-Dam, Kandel & Orliaguet, 2000). Ces résultats suggèrent que les capacités perceptives d'anticipation relèveraient en partie de l'expérience motrice des sujets.

Comme le suggèrent Bara *et al.* (2004), l'exploration manuelle des lettres volontairement initiée par les enfants serait la caractéristique principale pouvant expliquer l'efficacité de l'entraînement HVAM. Cet effet de la modalité haptique peut s'expliquer par le fait que les caractéristiques de l'exploration haptique chez les enfants de 5 ans semblent particulièrement bien adaptées pour percevoir de manière précise les objets. En effet, le sens haptique permet une meilleure discrimination des formes et des orientations (Itakura et Imamizu, 1994). De plus, on n'observe pas encore, à cet âge, la dominance de la vision sur le toucher qui reste encore la modalité perceptive préférentiellement utilisée pour explorer le monde et prendre connaissance des propriétés spatiales des objets (Hatwell *et al.*, 2000).

Les résultats obtenus au test d'identification de lettres montrent, comme attendu, une amélioration similaire du nombre moyen de lettres cibles correctement identifiées pour les trois entraînements. Comme dans les précédentes études, l'ensemble des résultats suggère que l'entraînement HVAM (et son exploration haptique des lettres *per se*) aide les enfants à mieux établir *les connexions* entre les représentations orthographiques des lettres et les représentations phonologiques des sons correspondants, améliorant ainsi leurs capacités de décodage. La conscience phonémique et la connaissance des lettres de l'alphabet sont des capacités indispensables à développer pour la compréhension et l'utilisation du principe alphabétique et par conséquent pour développer les mécanismes du décodage de l'écrit. Cependant, dans notre expérience, les enfants identifient en moyenne 2,78 lettres avant les entraînements mais sont incapables de décoder les pseudo-mots ($M = 0,57$). Après les entraînements, les enfants identifient en moyenne 1,91 lettres de plus mais sont capables de décoder correctement 5,54 pseudo-mots en moyenne après une exploration haptique des lettres (HVAM) et seulement 2,27 après une exploration visuelle séquentielle (VAM-biologique) et 1,36 après une exploration visuelle simultanée (VAM) (résultats qui ne diffèrent pas significativement entre eux). Bien que les enfants identifient en moyenne le même nombre de lettres après les trois interventions, les enfants effectuant une exploration haptique et visuo-haptique sont plus capables d'utiliser cette connaissance pour décoder les pseudo-mots. On ne constate pas de supériorité de

l'entraînement HVAM dans la connaissance des lettres qui pourrait expliquer la supériorité observée pour le décodage de pseudo-mots par une meilleure connexion entre les représentations des lettres et les représentations des sons correspondants via notamment une activation des représentations des lettres plus rapide et automatique. En effet, l'utilisation de l'exploration haptique dans l'appréhension des lettres pourrait engendrer une meilleure mémorisation et identification de la forme des lettres. Dans cette perspective, Hulme (1981) suggère que l'exploration haptique des lettres implique un double codage en mémoire moteur et visuel. Ce double codage permettrait alors une activation plus rapide des représentations des lettres qui se sont développées à l'aide de multiples sources d'informations. Récemment, Longcamp, Zerbato-Poudou et Velay (2005) ont montré que lorsque des enfants de 5 ans sont entraînés à tracer manuellement des lettres, leur mémorisation et par conséquent leur identification sont facilitées. On peut alors penser que le test d'identification des lettres utilisé dans la présente expérience constitue une mesure globale de cette connaissance qui doit prendre en compte l'identification des lettres mais également la rapidité à les identifier (voir les travaux de Manis, Seidenberg et Doi, 1999). La rapidité d'activation des représentations des lettres n'a pas été évaluée dans notre étude et des recherches complémentaires sont donc nécessaires pour tester cette hypothèse.

En conclusion, l'ensemble des résultats permet de confirmer l'intérêt de l'ajout de la modalité haptique dans un entraînement qui combine un travail sur la connaissance des lettres et des associations graphème/phonème et un travail permettant de développer la conscience phonémique. La conséquence la plus notable de ce type d'entraînement est l'effet positif sur la compréhension et l'utilisation du principe alphabétique et donc sur les capacités de décodage de pseudo-mots des enfants. Même si pour les trois interventions de nets progrès des connaissances des lettres et des sons ont été observés, les résultats ne mettent pas en évidence un effet positif supplémentaire de la séquentialité de l'exploration indépendamment des modalités sensorielles et confirment le rôle bénéfique de l'exploration haptique *per se*.

BIBLIOGRAPHIE

Bara, F., Gentaz, E., & Colé, P. (2006). Comment les enfants apprennent-ils à écrire et comment les y aider ? In P. Dessus

& E. Gentaz (Eds.), *Apprentissages et enseignement. Sciences cognitives et éducation* (pp. 9-24). Paris : Dunod.

- Bara, F., Gentaz, E., Colé, P., & Sprenger-Charolles, L. (2004). The visuo-haptic and haptic exploration of letters increases the kindergarten-children's reading acquisition. *Cognitive Development*, 19, 433-449.
- Bus, A. G., & Van Ijzendoorn, M. H. (1999). Phonological awareness and early reading: A meta-analysis of experimental training studies. *Journal of Educational Psychology*, 91, 403-414.
- Byrne, B., & Fielding-Barnsley, R. (1989). Phonemic awareness and letter knowledge in child's acquisition of the alphabetic principle. *Journal of Educational Psychology*, 81, 313-321.
- Byrne, B., & Fielding-Barnsley, R. (1990). Acquiring the alphabetic principle: a case of teaching recognition of phoneme identity. *Journal of Educational Psychology*, 82, 805-812.
- Byrne, B., & Fielding-Barnsley, R. (1991). Evaluation of a program to teach phonemic awareness to young children. *Journal of Educational Psychology*, 83, 451-455.
- Castles, A., & Coltheart, M. (2004). Is there a causal link from phonological awareness to success in learning to read? *Cognition*, 91, 77-111.
- Ehri, L. C., Nunes, S. R., Willows, D. M., Schuster, D. M., Yaghoub-Zadeh, Z., & Shanahan, T. (2001). Phonemic awareness instruction helps children learn to read: Evidence from the National reading Panel's meta-analysis. *Reading Research Quarterly*, 36, 250-287.
- Gentaz, E., Colé, P., & Bara, F. (2003). Évaluation d'entraînements multisensoriels de préparation à la lecture chez les jeunes enfants de grande section maternelle : étude sur la contribution du système haptique manuel. *L'Année Psychologique*, 104, 561-584.
- Hatwell, Y., Streri, A., & Gentaz, E. (2000). *Toucher pour connaître. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle*. Paris : P.U.F.
- Hulme, C. (1981). *Reading retardation and multisensory teaching*. Londres : Routledge & Kegan Paul.
- Itakura, S., & Imamizu, H. (1994). An exploratory study of mirror-image shape discrimination in young children: vision and touch. *Perceptual and Motor Skills*, 78, 83-88.
- Kandel, S., Orliaguet, J.-P., & Viviani, P. (2000). Perceptual anticipation in handwriting: The role of implicit motor competence. *Perception and Psychophysics*, 62, 706-716.
- Lacquaniti, F., Tuerzuolo, C., & Viviani, P. (1983). The law relating the kinematic and figural aspects of drawing movements. *Acta Psychologica*, 54, 115-130.
- Lieberman, A.M., & Mattingly, I. (1985). The motor theory of speech perception revised. *Cognition*, 21, 1-36.
- Longcamp, M., Zerbato-Poudou, M.-T., & Velay, J.-L. (2005). The influence of writing practice on letter recognition in preschool children: A comparison between handwriting and typing. *Acta Psychologica*, 119, 67-79.
- Louis-Dam, A., Kandel, S., & Orliaguet, J.-P. (2000). Anticipation motrice et anticipation perceptive. *Psychologie Française*, 45, 333-342.
- Manis, F. R., Seidenberg, M. S., & Doi, L. M. (1999). See Dick RAN: Rapid naming and the longitudinal prediction of reading sub-skills in first and second graders. *Scientific Studies of Reading*, 3, 129-157.
- Muter, V., Hulme, C., Snowling, M., & Taylor, S. (1998). Segmentation not rhyming, predicts early progress in learning to read. *Journal of Experimental Child Psychology*, 71, 3-23.
- Orliaguet, J.P., Kandel, S., & Boë, L.J. (1997). Visual perception of cursive handwriting: Influence of spatial and kinematic information on the anticipation of forthcoming letters. *Perception*, 26, 905-912.
- Rondal, J. A. (1997). *L'évaluation du langage*. Liège : Mardaga.

- Scarborough, H. S. (2001). Connecting early language and literacy to later reading (di) abilities: Evidence, theory and practice. In S. B. Neuman & D. K. Dickinson (Eds.), *Handbook of early literacy research* (pp. 97-110). New York: Guilford Press.
- Sprenger Charolles, L. (2004). Linguistic processes in reading and spelling: The case of alphabetic writing systems: English, French, German and Spanish. In T. Nunes & P. Bryant (Eds.), *Handbook of Children's Literacy* (pp. 43-65). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Sprenger Charolles, L., & Colé, P. (2005, réédition de 2003). *Lecture et dyslexie : approche cognitive*. Paris: Dunod.
- Sprenger Charolles, L., & Colé, P. (sous- presse). Incidence de certaines caractéristiques de l'orthographe sur l'apprentissage de la lecture. In F. Martineau, Y. C. Morin & A. Desrochers (Eds.), *Normes et pratiques orthographiques*. Ottawa : David Editions.
- Sprenger Charolles, L., Colé, P., & Serniclaes, W. (2006). *Reading acquisition and developmental dyslexia*. London : Psychology Press.
- Sprenger Charolles, L., Colé, P., Béchennec, D., & Kipffer-Piquard, A. (2005). French normative data on reading and related skills from EVALEC, a new computerized battery of tests (end Grade1, Grade 2, Grade 3, and Grade 4). *European Journal of Applied Psychology*, 55, 157-186.
- Sprenger Charolles, L., Siegel, L. S., Béchennec, D., & Serniclaes, W. (2003). Development of phonological and orthographic processing in reading aloud, in silent reading, and in spelling: A four-year longitudinal study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 84, 194-217.
- Sprenger-Charolles, Siegel, L. S., & Bonnet, P. (1998). Phonological mediation and orthographic factors in reading and spelling. *Journal of Experimental Child Psychology*, 68, 134-155.
- Viviani, P. (2002). Motor competence in the perception of dynamic events. In W. Prinz & B. Hommel (Eds.), *Common mechanisms in perception and action: Attention and performance* (pp. 406-442). Oxford : Oxford University Press.
- Viviani, P., & Stucchi, N. (1989). The effect of movement velocity on form perception: Geometric illusions in dynamic displays. *Perception and Psychophysics*, 46, 266-274.
- Viviani, P., & Stucchi, N. (1992). Biological movements look uniform: Evidence of motor perceptual interactions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 603-623.
- Ziegler, J. C., & Goswami, U. (2005). Reading acquisition, developmental dyslexia, and skilled reading across languages: a psycholinguistic grain size theory. *Psychological Bulletin*, 131 (1), 3-29.

ANNEXES

Annexe 1 : Matériel des prétests et des post-tests

Lettres a, i, r, l, t, p, b

Pseudo-mots

li, ti, ba, ita, ari, abi, iba, ila, ipa, rapi, tiba, lati

Identification de phonèmes en position initiale

Entraînement :

canard / couteau – nuage – gâteau

nez / noix – feu – cartable

singe / salade – verre – clou

Test :

-a- haricot / avion – télé – éléphant

-i- iris / île – vase – gomme

-r- roseau / roue – ciseaux – poupée

-l- lézard / lavabo – peigne – collier

-t- table / torchon – bonnet – peluche

-p- pain / poussette – marteau – cerise

-b- bague / bouée – chemise – stylo

Identification de phonèmes en position finale

Entraînement :

trousse / brosse – roi – fruits

orange / cage – manteau – croissant

douche / peluche – gant – classeur

Test :

-a- koala / compas – fauteuil – short

-i- lit / toupie – clé – pomme

-r- poire / voiture – chaussons – balle

-l- cheval / bulle – camion – éponge

-t- noisette / carte – glace – livre

-p- lampe / taupe – montre – escargot

-b- colombe / herbe – vélo – tigre

Annexe 2 : Matériel des séances d'entraînement

Phonème /a/

Comptine

Marina et son papa
Mangent des glaces au chocolat
Oh lala, oh lala,
Il n'y en aura pas pour le repas
C'est pas grave,
À la place, il y aura
De l'ananas

Posters

Phonème en position initiale
Cibles : abeille, allumettes, abricot
Distracteurs : fauteuil, chameau, gâteau

Phonème en position finale
Cibles : pizza, rat, caméra
Distracteurs : violon, fraise, skieur

Cartes

Phonème en position initiale : arc, ardoise, araignée, hache, anneau, argent
Phonème en position finale : pas, chocolat, cobra, cadenas, chat

Phonème /i/

Comptine

Une souris sur un tapis
Grignotait un p'tit radis
Grise était la souris
Rose était le radis
Mais le gros chat mistigri
A mangé la p'tite souris
Et il a laissé le radis
Un radis ? Pour Mistigri

Posters

Phonème en position initiale
Cibles : igloo – hippopotame – hirondelle
Distracteurs : guitare – cadeau – champignon

Toucher et voir des lettres

561

Phonème en position finale

Cibles : riz – rôti – souris

Distracteurs : grenouille – sandwich – crayon

Cartes

Phonème en position initiale : hibou – île – immeuble – hippocampe – images – hiver

Phonème en position finale : scie – nid – fourmi – cadi – momie – radis

Phonème /r/

Comptine

Qui mang'ra du riz ?

C'est le roi, c'est le rat

C'est le roi des rats

Qui mang'ra du riz ?

Ni le roi, ni le rat

Ni le roi des rats

Posters

Phonème en position initiale

Cibles : rose - reine – robe

Distracteurs : masque – sac – dauphin

Phonème en position finale

Cibles : classeur – chaussures – cuillères

Distracteur : papillon – bouteille – escalier

Cartes

Phonème en position initiale : raisin – route – requin – râteau – radis – ruche

Phonème en position finale : peinture – castor – fleur – verre – beurre – guitare

Phonème /l/

Comptine

Léo doit se lever

Pour aller se laver

Il aimerait rester au lit

Mais aujourd'hui c'est lundi

Il met son pantalon

Son pull et son blouson

Boit son lait

Noue ses lacets

Et s'en va à l'école

Posters

Phonème en position initiale

Cibles : loup – luge – lapin

Distracteurs : renard – bottes – chaise

Phonème en position finale

Cibles : étoile – poule – sel

Distracteurs : toit – mouche – canard

Cartes

Phonème en position initiale : légo – lit – lion – louche – lait – lutin

Phonème en position finale : pendule – cagoule – bol – pelle – moules – journal

Phonème /t/

Comptine

Titi tape sur son tambour

La taupe Tina terrifiée

Sort la tête de son terrier

« Arrête ton tapage »

Tu vas nous rendre toc toc

Mais Titi tape tape tape

Encore et toujours

Sur son p'tit tambour

Posters

Phonème en position initiale

Cibles : tortue – tomate – tambour

Distracteurs : chapeau – poisson – cerf

Phonème en position finale

Cibles : pâtes – boîte – lunettes

Distracteurs : soleil – cochon – poulet

Cartes

Phonème en position initiale : tasse – tableau – téléphone – tournevis – toit – tapis

Phonème en position finale : carotte – brouette – mouette – porte – veste

Phonème /p/

Comptine

Pauvre petit papa

Parti pour Paris

Toucher et voir des lettres

563

Pour pêcher plusieurs
Petits poissons pourris
Passant par plusieurs
Petits ponts
Pour pêcher plusieurs
Petits poissons

Posters

Phonème en position initiale
Cibles : parc – pinguin – piscine
Distracteurs : château – mouton – oie
Phonème en position finale
Cibles : loupe – guêpe – écharpe
Distracteurs : balai – chèvre – citron

Cartes

Phonème en position initiale : parasol – pantalon – poule – pastèque –
plante – piano
Phonème en position finale : coupe – crêpe – soupe – jupe – tulipe – cape

Phonème /b/

Comptine

Bali balo sur un bateau
Se balade sur l'eau du bain
De Lisbonne à Bilbao,
Buvant bon et buvant bien
Bali barbotte sans bouée
C'est ballot, il est tombé
Avec ses bottes, son bonnet,
Il bat l'eau comme un benêt

Posters

Phonème en position initiale
Cibles : bougie – baleine – bateau
Distracteurs : chien – journal – coq
Phonème en position finale
Cibles : robe – globe – tube
Distracteurs : couteau – vache – hérisson

Cartes

Phonème en position initiale : batterie, balançoire, barque, ballon, bouton
Phonème en position finale : cubes, globe, robe, crabe, tombe

Annexe 3 : Matériel de la séance de révision : les dominos

Phonèmes en position initiale

Tracteur / landau, laine / agrafeuse, arbre / tabouret
Tondeuse / hibou, hippopotame / biberon, baignoire / réveil
Radio / pieuvre, perroquet / arrosoir, anorak / train
Thermomètre / images, igloo / bracelet, berceau / règle
Rhinocéros / pouce, pinceaux / lessive, limace / toboggan

Phonèmes en position finale

Frites / colle, crocodile / panda, pyjama / marionnette
Casquette / ski, pie / tube, robe / ceinture
Hélicoptère / harpe, nappe / boa, soldat / flûte
Cravate / kiwi, tapis / cube, crabe / placard
Facteur / enveloppe, écharpe / ampoule, poubelle / cuvette

F. Article 2 : Hillairet de Boisferon, Colé, & Gentaz (2010)

Hillairet de Boisferon, A., Colé, P., & Gentaz, E. (2010). Connaissance du nom et du son des lettres, habiletés métaphonémiques et capacités de décodage en grande section de maternelle. *Psychologie Française*, 55, 91-111.

Author's personal copy



Disponible en ligne sur www.sciencedirect.com



Psychologie française 55 (2010) 91–111

**Psychologie
française**

www.em-consulte.com

Article original

Connaissance du nom et du son des lettres, habiletés métaphonémiques et capacités de décodage en grande section de maternelle

Letter-name and letter-sound knowledge, metaphonemic abilities and decoding skills in senior kindergarten

A. Hillairet de Boisferon^{a,1,*}, P. Colé^{b,2}, E. Gentaz^{a,3}

^a UMR 5105, CNRS, laboratoire de psychologie et neurocognition, université Pierre-Mendès France, BP 47, 38040 Grenoble cedex 9, France

^b UMR 6146, CNRS, laboratoire de psychologie cognitive, université de Provence, 3, place Victor-Hugo, 13331 Marseille cedex 3, France

Reçu le 20 décembre 2009 ; accepté le 22 mai 2010

Résumé

L'objectif de cette recherche était d'étudier l'influence particulière de la connaissance du nom des lettres dans l'acquisition de la lecture chez des enfants de cinq ans scolarisés en grande section de maternelle. De nombreuses études ont souligné l'importance des connaissances métaphonologiques et orthographiques (connaissance des lettres et des associations graphophonologiques développées au cours de l'apprentissage de la lecture). Nous nous sommes donc intéressés aux liens existants entre ces différentes connaissances ainsi qu'aux liens qu'elles entretiennent avec le décodage au cours de l'année scolaire. Pour ce faire, nous avons proposé à 40 enfants, en décembre et en avril, des épreuves d'habiletés métaphonémiques (identification de phonème en position initiale et finale dans les mots), de connaissance du son et du nom (dénomination et identification) des lettres et une tâche de décodage de pseudomots. Pour la connaissance du nom des lettres, deux types de mesures ont été proposés, une mesure de précision et une mesure de rapidité évaluant l'automatisation de l'accès à cette connaissance. Les nombres moyens de réponses correctes et les temps de réaction moyens recueillis pour chaque enfant, en début et en fin d'année, ont été utilisés pour différentes

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : anne.hillairet@upmf-grenoble.fr (A. Hillairet de Boisferon).

¹ Doctorante en psychologie cognitive ; thèmes de recherche : apprentissages multisensoriels, lecture, écriture.

² Professeur des universités ; thèmes de recherche : reconnaissance des mots écrits chez le lecteur-expert, apprentissage de la lecture, difficultés de lecture.

³ Directeur de recherche ; thèmes de recherche : apprentissages multisensoriels, lecture, écriture.

Author's personal copy

92

A. Hillairet de Boisferon et al. / *Psychologie française* 55 (2010) 91–111

analyses corrélationnelles. Les résultats révèlent qu'en décembre, la connaissance du nom des lettres jouerait un rôle dans le développement des habiletés métaphonémiques et dans la découverte et l'acquisition des associations lettres-sons (évaluées avec une tâche de connaissance du son des lettres). La connaissance du nom des lettres pourrait donc influencer indirectement, via l'amélioration de ces compétences, le niveau de décodage ultérieur des enfants. De plus, le lien direct entre la connaissance du nom des lettres et les capacités de décodage, déjà observé en décembre, se confirme. Enfin, l'analyse des mesures de rapidité de l'utilisation de la connaissance du nom des lettres montre que les enfants qui dénomment un nombre important de lettres sont aussi ceux qui les dénomment le plus rapidement. Ce dernier résultat laisse supposer qu'un certain niveau de connaissance du nom des lettres doit être atteint avant de pouvoir automatiser son utilisation. L'ensemble des résultats confirme l'importance, dans les premiers temps de l'apprentissage de la lecture, d'une bonne connaissance du nom des lettres. Nous suggérons également, pour une meilleure compréhension des mécanismes d'acquisition de la lecture et de ces composantes, la prise en compte d'indices reflétant l'automatisation de l'utilisation de la connaissance du nom des lettres.

© 2010 Société française de psychologie. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots clés : Connaissance du nom des lettres ; Automatisation ; Connaissance du son des lettres ; Habiletés métaphonémiques ; Capacités de décodage

Abstract

This study examined the specific implication of letter-name knowledge in reading acquisition on 5-year-old kindergarten children. Several studies underlined the importance of both phonological and orthographic skills (letters and grapho-phonological associations' knowledge developed during reading acquisition). So, we focused on the link between those different early abilities and on their links with reading acquisition during school year. Thus, at the beginning and at the end of the year, we proposed to 40 children metaphonemic tasks (phoneme identification in initial and final position in the words), letter-sound and letter-name knowledge tasks (naming and identification) and a pseudo-words decoding task. In addition, to access letter-name knowledge, two types of measurements were proposed: an accuracy measure and a speed one. Mean number of correct responses and reaction times were collected by children and analysed too. Results show that letter-name knowledge could play a part in metaphonemic abilities development and in letter-sound associations' discovery and acquisition, at the beginning of the year. Thanks to those skills improvement, letter-name knowledge could have an indirect impact on later children's decoding skills. Furthermore, the direct link, already observed at the beginning of the year, between letter-name knowledge and decoding skills still exists in April. At last, analyses on letter-name knowledge access time show that the more children name an important number of letters, the more they do it quickly. These results could mean that a certain level of letter-name knowledge have to be reach before children could use this knowledge automatically. All together, results confirm the importance of good letter-name knowledge in the first stages of reading acquisition. We also suggest taking into account some clues of letter-name knowledge's automatic use to better understand reading acquisition processes.

© 2010 Société française de psychologie. Published by Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

Keywords: Letter-name knowledge; Automatization; Letter-sound knowledge; Metaphonemic abilities; Decoding skills

1. Introduction

Pour apprendre à lire dans un système d'écriture alphabétique, il est nécessaire que les enfants comprennent le principe alphabétique, c'est-à-dire que les lettres (graphèmes) de l'écrit représentent les sons (phonèmes) de l'oral. Pour cela, ils doivent également concevoir que les mots parlés sont constitués d'unités phonologiques et développer une conscience

Author's personal copy

A. Hillairet de Boisferon et al. / *Psychologie française* 55 (2010) 91–111

93

phonologique de l'oral (i.e., la capacité d'identifier et de manipuler de manière consciente les unités phonologiques des mots parlés). L'acquisition de la lecture suppose donc, à la fois, des compétences métalinguistiques et une connaissance des lettres de l'alphabet.

1.1. La conscience phonologique

Les recherches focalisées sur le rôle de la conscience phonologique dans l'acquisition de la lecture suggèrent qu'il existe un lien causal et réciproque entre la conscience phonologique et les compétences en lecture. Scarborough (1998), dans une méta-analyse comprenant 27 études, obtient un coefficient de corrélation moyen de 0,46 (S.D. = 0,16) en utilisant les scores dans des épreuves de conscience phonologique recueillis en maternelle comme prédicteur du niveau ultérieur de lecture. Ainsi, les enfants qui possèdent précocement un bon niveau de conscience phonologique manifestent ultérieurement de bonnes performances en lecture (pour une étude en français voir par exemple, Casalis et Louis-Alexandre, 2000). Inversement, des enfants avec de faibles compétences en lecture manifesteraient également un faible niveau de conscience phonologique (Morais et al., 1979), comme c'est le cas de certains dyslexiques (Colé et Sprenger-Charolles, 1999). Dans le même sens, il a souvent été observé que les entraînements phonologiques sont efficaces pour faciliter l'apprentissage de la lecture, parce qu'ils favoriseraient la découverte du principe alphabétique (Bradley et Bryant, 1991 ; Bus et Van Ijzendoorn, 1999 ; Byrne et Fielding-Barnsley, 1990, 1991 ; pour une revue récente, Castles et Coltheart, 2004). Toutefois, il est important de souligner que la valeur prédictive de la conscience phonologique sur l'apprentissage de la lecture serait essentiellement due, même s'il existe encore certains débats, au développement de la conscience dite phonémique plutôt qu'à celui de la conscience de plus larges segments comme les rimes et syllabes (Muter et al., 1998). C'est le développement de la conscience phonémique qui conduirait, à terme, l'enfant à comprendre le principe alphabétique. Cependant, comme le suggèrent certains chercheurs (Carroll et al., 2003), la conscience de segments phonologiques, comme les syllabes et les rimes, se développerait plus naturellement dès les débuts de la scolarisation et serait un précurseur important de la conscience phonémique. En revanche, le développement de la conscience phonémique requiert un enseignement plus explicite avec une orientation plus spécifique des activités phonologiques vers les correspondances lettres-sons. L'apprentissage du code alphabétique contribuerait au développement des habiletés phonologiques et particulièrement phonémiques, et ces mêmes habiletés faciliteraient en retour l'apprentissage de la lecture (Morais et al., 1986). Ainsi, conscience phonologique et apprentissage de la lecture s'influenceraient mutuellement.

1.2. La connaissance des lettres

L'apprentissage des lettres constitue un élément crucial du développement de la conscience phonémique. Castles et Coltheart (2004) font l'hypothèse que la conscience phonémique se développerait à partir de connaissances orthographiques. Selon ces auteurs, l'apprentissage de l'écrit alphabétique permettrait à l'apprenti-lecteur de réaliser des tâches de conscience phonémique en rendant possible la manipulation des phonèmes à l'aide des images orthographiques des mots. En considérant par exemple une tâche classique de suppression de phonème, les prélecteurs qui possèdent peu ou pas de connaissances de la forme écrite des mots, devront résoudre la tâche en tentant de segmenter les sons dans les mots afin de supprimer le phonème requis. Les enfants possédant de meilleures connaissances orthographiques pourront résoudre la tâche phonologiquement mais aussi orthographiquement en supprimant la lettre ou le groupe de lettres qui correspondent au

Author's personal copy

phonème cible (Castles et al., 2003). Dans le même ordre d'idées, Carroll (2004) montre que l'accroissement de la connaissance des lettres affecte de manière inégale les différentes tâches de conscience phonémique. Par exemple, la connaissance des lettres serait plus fortement associée à la réussite à une tâche de substitution de phonème qu'à celle de suppression ou d'identification de phonème. La conscience phonémique ne serait donc pas une compétence qui se développerait en tout ou rien, et certains aspects de cette connaissance seraient plus ou moins fortement liés aux connaissances orthographiques et à la lecture. Toutefois, l'accès conscient aux phonèmes du langage oral n'est pas impossible en l'absence de connaissance orthographique. Ainsi, Hulme et al. (2005) ont montré qu'un certain degré de manipulation phonémique peut être atteint par des enfants pour des phonèmes dont ils ne connaissent pas la correspondance graphique. Néanmoins, l'intérêt de l'hypothèse émise par Castles et Coltheart (2004) est de soulever la question de l'influence des connaissances orthographiques sur le développement de la conscience phonémique et de la lecture.

1.3. La connaissance du nom des lettres

La connaissance d'une lettre suppose celle de sa forme mais également celle du nom et du son qui correspondent à cette forme. De fait, de nombreux travaux ont également mis en évidence le rôle déterminant de la connaissance du nom des lettres dans l'acquisition de la lecture. Scarborough (1998) observe sur 24 études une corrélation moyenne de 0,52 (S.D. = 0,14) entre des scores de dénomination de lettres et le niveau de lecture ultérieur. L'influence sur la lecture de la connaissance du nom des lettres, comme premier support de l'apprentissage des associations arbitraires lettre-son, a été abordée dans certaines recherches (pour une revue en français, voir Foulon, 2007). Ainsi, Evans et al. (2006) montrent que la connaissance du nom des lettres (dénomination de lettres majuscules et minuscules) évaluée en grande section de maternelle prédit 51 % de l'augmentation de l'identification de mots isolés lors de la première année d'apprentissage de la lecture ; prédiction plus importante que celle de la connaissance du son des lettres (41 %). Ce résultat peut s'expliquer par le fait qu'en maternelle, la plupart des sons des lettres ne sont pas encore connus. Cependant, il semblerait que le pouvoir de prédiction de la connaissance du nom des lettres diminue dès la fin de la grande section de maternelle, ce qui pourrait s'expliquer par des performances en dénomination qui plafonnent (Schatschneider et al., 2004). Les études sur le rôle de la connaissance des lettres, et plus particulièrement du nom des lettres, dans l'acquisition de la lecture permettent d'apporter un nouvel éclairage sur le lien entretenu par ces deux acquisitions. Un premier type de recherche initié par Ehri (Ehri et Wilce, 1985 ; Scott et Ehri, 1990) montre que lorsque les enfants commencent à lire et qu'ils ne connaissent pas le nom des lettres, il est plus facile pour eux d'apprendre à lire des mots composés de lettres visuellement saillantes, mais sans lien avec la prononciation des mots, que des mots phonologiquement plausibles où les lettres représentent les sons entendus dans le mot. Mais les enfants qui connaissent le nom des lettres montrent le pattern inverse ; ils apprennent des orthographe à indices phonologiques plus aisément que des orthographe à indices visuels (De Abreu et Cardoso-martins, 1998). De plus, il a été montré que des enfants prélecteurs, avec un niveau moyen de connaissance du nom des lettres, pouvaient être amenés, lorsque la demande de la tâche augmente (c'est-à-dire lorsque le nombre de nouveaux mots à apprendre devient plus important), à utiliser une stratégie d'apprentissage analytique basée sur la correspondance entre la lettre et sa valeur phonologique (Ross et al., 2004). En effet, augmenter la demande de la tâche pourrait parfois encourager les enfants à tirer avantage de leurs compétences alphabétiques même faibles. Les relations systématiques entre les lettres et leurs noms rendraient plus aisé l'apprentissage d'un nombre important

de mots puisqu'elles permettraient de déduire la prononciation des mots plutôt que d'utiliser des stratégies d'apprentissage par cœur des associations forme écrite-forme orale. Ces recherches supportent l'idée générale que la connaissance du nom des lettres peut être utilisée pour lier l'oral et écrit ; qu'elle peut sensibiliser les enfants à la nature phonologique de l'écrit. Dans ce sens, les recherches de Treiman et al. (1996) montrent que les enfants prélecteurs établiraient les premiers liens entre l'oral et l'écrit en découvrant qu'il existe des liens entre les lettres dans les mots écrits et le nom des lettres dans les mots parlés. Dans leur recherche, les jeunes enfants fournissent, par exemple, plus facilement la première lettre de *beach* (plage) que la première lettre de *bone* (os), parce que la forme parlée de *beach* commence par /bil/, le nom de la lettre *b*, alors que la forme parlée de *bone* commence par /bol/, qui ne correspond pas au nom d'une lettre en anglais. Dans les premiers temps de l'acquisition de la lecture, ces liens orthographe-sons seraient incomplets et se manifesteraient principalement pour les lettres en position initiale et finale dans les mots. Plus tard, l'utilisation des liens graphophonologiques évoluerait et prendrait davantage appui sur la connaissance du son des lettres. Pour progresser dans la compréhension du principe alphabétique, les enfants doivent donc apprendre que les lettres dans les mots écrits correspondent à l'oral aux phonèmes des mots parlés.

1.4. La connaissance du son des lettres

La connaissance du nom des lettres influencerait la découverte des liens lettres-sons notamment parce que le nom de certaines lettres correspond au son qui leur est associé. Ainsi, par exemple, le nom des voyelles simples (*a, e, i, o, u*) est identique à leur son. En revanche, pour les consonnes plusieurs cas se présentent. Certaines consonnes, comme *b*, dont le nom se prononce /bé/, possèdent leurs sons, ici /b/, au début de leur nom (consonnes de type CV). D'autres consonnes, comme *f*, possèdent leurs sons à la fin de leur nom (consonne de type VC). Le nom de la lettre *f* soit /èf/ se termine avec le phonème /f/ qu'il symbolise. Enfin, certains liens entre le nom des consonnes et leurs sons sont arbitraires comme pour le *h*. Le lien unissant le nom et le son des lettres (qui renvoie aux différents types de lettres et à la structure phonologique de leur nom) aurait des conséquences directes sur l'apprentissage du nom lui-même et sur l'apprentissage du son des lettres. Ainsi, les noms de lettres qui contiennent le son de la lettre seraient mieux appris que ceux qui ne le contiennent pas. Plus précisément, les études sur la connaissance du nom des lettres montrent que les noms des voyelles sont plus facilement appris que les noms des consonnes (Cormier, 2006 ; Ecalle, 2004). Cependant, les études destinées à évaluer la connaissance du nom des lettres en fonction de leur structure phonologique conduisent à des résultats contradictoires. Ainsi, pour Cormier (2006), les consonnes de type VC seraient mieux dénommées et même écrites que les consonnes de type CV pour les lettres majuscules et minuscules. Néanmoins, pour Ecalle (2004), il n'existe aucune différence de niveau d'identification entre des consonnes de type VC ou CV dans le répertoire « cursives » alors que l'avantage est aux consonnes de type CV dans le répertoire « imprimerie ». Enfin, Treiman et Broderick (1998) relèvent des scores de dénomination et d'écriture de lettres équivalents quelle que soit la structure phonologique des consonnes majuscules. Concernant l'apprentissage du son des lettres, Share (2004) montre qu'il est favorisé par l'apprentissage préalable du nom des lettres. Plus précisément, les correspondances lettres-sons, pour les lettres dont le nom contient le phonème, sont apprises plus aisément que pour les lettres qui ne contiennent pas le phonème pertinent (principe d'acrophonie). Cet effet du type de lettre s'est révélé plus important pour les voyelles, puis pour les consonnes de type CV, par rapport aux consonnes de type VC ou les consonnes dont le son n'est pas clairement relié au nom (Ecalles, 2004 ; Ecalle et al., 2008 ; Evans et al., 2006 ; McBride-Chang, 1999 ; Treiman et

Broderick, 1998). Néanmoins, connaître le nom d'une lettre n'est pas une condition nécessaire pour l'apprentissage du son, même si cela le favorise. C'est ce que montre une étude en hébreu où, après une même procédure et un même temps d'entraînement, des enfants de cinq ans étaient meilleurs pour connecter les graphèmes à leurs représentations phonémiques qu'à leurs noms (Levin et al., 2006).

En résumé, la connaissance du nom des lettres exerce une influence sur le développement de la connaissance du son des lettres et des associations lettres-sons. Toutefois les relations qu'elle entretient avec la conscience phonémique restent à préciser.

1.5. La dénomination rapide

La prise en compte des habiletés phonologiques et de la connaissance du nom des lettres comme compétences précoces et cruciales pour l'apprentissage de la lecture est largement validée. Toutefois, ces deux compétences bien que prédictrices des premières compétences en lecture se révèlent souvent insuffisantes pour dépister les individus à risque de développer des troubles de la lecture (Scarborough, 1998). Dans ce cadre, une tâche de dénomination rapide sérielle (*rapid automatized naming* [RAN], Denckla et Rudel, 1974) s'est révélée particulièrement intéressante pour identifier différents niveaux de lecture (Watson et Willows, 1995) et prédire les futures compétences en lecture (pour une revue voir Scarborough, 1998). La tâche de RAN consiste à lire à haute voix et le plus rapidement possible cinq items (e.g., chiffres ou lettres) répétés dix fois chacun. Le RAN impliquerait donc une importante variété de processus, attentionnels, visuels, phonologiques (notamment en termes de précision et de rapidité) et articulatoires. Ainsi, le processus de dénomination rapide a été souvent apparenté aux traitements phonologiques impliqués dans la lecture, soit l'activation des représentations phonologiques nécessaire pour identifier un mot écrit. Cependant bien que dénomination rapide et habiletés métaphonologiques (notamment phonémiques) entretiennent des relations, qualifiées de complexes par Ramus (2003), chacune participe de manière indépendante à la variance des compétences en lecture (Manis et al., 1999). La conscience phonémique serait corrélée aux mesures de la précision de l'identification des mots (niveau du mot) et du décodage graphème-phonème (niveau de la lettre), alors que la dénomination rapide serait davantage corrélée à la rapidité d'identification des mots et à la rapidité du décodage (Manis et al., 2000 ; Wolf et al., 2000). De plus, pour le RAN, la rapidité d'accès aux représentations des différents symboles (e.g., couleur, lettres), serait le reflet de liens spécifiques avec les différentes tâches de lecture (e.g., lecture orale de mots isolés, de texte, tâches de compréhension) (Wolf et al., 1986). Enfin, le pouvoir prédictif de la dénomination rapide serait plus important au début de l'apprentissage de la lecture (Manis et al., 2000 ; Wolf et al., 1986). Dans les premières années de l'acquisition de la lecture, on peut considérer qu'une lecture précise et rapide (fluente), de mots et textes, serait le résultat du développement d'une certaine qualité initiale des processus sublexicaux (phonologiques) et lexicaux (orthographiques) engagés dans l'identification des mots écrits et de leur automatisation progressive. Une fois la lecture acquise, la fluence reflèterait davantage un décodage précis et automatique qui ne demanderait que peu de ressources attentionnelles, celles-ci pouvant alors être affectées aux traitements visant à la compréhension de ce qui est lu (Wolf et Katzir-Cohen, 2001).

Le modèle de Laberge et Samuels (1974), qui traite de l'automatisme du traitement de l'information dans l'activité de lecture, peut fournir un cadre d'interprétation intéressant pour les tâches de dénomination rapide. Classiquement dans les modèles de lecture, l'information visuelle est transformée en passant par plusieurs étapes de traitements visuels, phonologiques

Author's personal copy

A. Hillairet de Boisferon et al. / *Psychologie française* 55 (2010) 91–111

97

et sémantiques. D'après les auteurs et Bonnefoy et Rey (2008), l'efficience des processus mis en jeu à chaque niveau de traitement, pourrait être évaluée sur la base de deux critères : la précision et la rapidité qui permet d'en mesurer l'automatisme. Un comportement final automatique impliquerait une automatisation de chacune des sous-étapes de traitement dont il est le résultat. En résumé, une lecture précise et automatique se fonderait sur des processus orthographiques et phonologiques eux-mêmes efficaces et automatisés. Cela expliquerait en partie le pouvoir prédictif, sur la réussite en lecture, de la connaissance du nom et du son des lettres, de la dénomination rapide et des habiletés métaphonémiques. Enfin, chez les apprenti-lecteurs, une identification précise et rapide des lettres, première étape de la lecture, serait donc particulièrement importante.

1.6. Objectifs de la recherche

Dans cette recherche, nous proposons d'étudier, de manière longitudinale (décembre à avril), dans une classe de grande section de maternelle, les liens entre les différentes acquisitions préélémentaires classiquement impliquées dans l'apprentissage de la lecture : la connaissance du nom et du son des lettres et les habiletés métaphonémiques. Nous souhaitons également étudier les liens entre ces différentes compétences alphabétiques et métaphonémiques, mesurées au cours de l'année, et le niveau de compréhension et d'utilisation du principe alphabétique, tel que mesuré par une épreuve de décodage de pseudomots en fin d'année. Dans ce cadre, nous voulons montrer que la connaissance du nom des lettres a une importance fondamentale dans les étapes initiales de l'apprentissage de la lecture en influençant le développement des habiletés métaphonémiques et celui des correspondances graphophonémiques. Nous proposerons pour mesurer plus précisément le développement de la connaissance du nom des lettres plusieurs types de mesures de cette connaissance. Ainsi, des mesures de précision (nombre de réponses correctes) et de rapidité (temps de réponses correctes) de l'utilisation de la connaissance du nom des lettres seront recueillies via une tâche d'identification (l'enfant doit montrer la lettre dont le nom a été énoncé) et une tâche de dénomination de lettres (l'enfant doit donner le nom de la lettre qui lui est présentée). L'utilisation de temps de réaction, comme mesure de l'automatisation de la connaissance des lettres, a été préférée au RAN. En effet, nous avons fait l'hypothèse qu'il s'agit d'une mesure plus directe de l'accès au nom des lettres car elle implique un moins grand nombre de processus, notamment attentionnels.

Dans un premier temps, nous nous attendons à observer une amélioration des performances et des corrélations importantes pour chaque compétence entre décembre et avril. Ces effets devraient s'expliquer par les enseignements spécifiques et explicites sur la forme, le nom et le son des lettres reçus par les enfants au cours de l'année scolaire. De plus, nous pensons que les compétences alphabétiques et métaphonémiques seront corrélées entre elles dès le mois de décembre. Concernant les liens plus spécifiques avec la connaissance du nom des lettres, à partir de la littérature, nous émettons l'hypothèse selon laquelle cette connaissance sera plus fortement corrélée avec la connaissance du son des lettres et les habiletés métaphonémiques en début d'apprentissage du système alphabétique. L'analyse des temps de réponse aux épreuves de connaissance du nom des lettres devrait révéler une corrélation négative entre les scores de rapidité et de précision, et cette corrélation devrait être plus importante en avril lorsque les enfants connaissent davantage de lettres et que cette connaissance est aussi plus ancrée (stable).

Dans un second temps, l'étude des liens entre compétences alphabétiques, métaphonémiques et capacités de décodage devrait montrer, dès décembre, que les enfants les plus performants dans chacune des épreuves alphabétiques et métaphonémiques seront aussi les meilleurs décodeurs

Author's personal copy

en avril. Dans ce cadre, nous pensons que la connaissance du nom des lettres influencera fortement dès le début de l'année de grande section de maternelle les performances en décodage. Enfin, dès que l'utilisation de la connaissance des lettres sera suffisamment automatisée (au mois d'avril), les temps de réaction associés à cette connaissance auront également une influence sur les performances de décodage.

2. Méthode

2.1. Participants

Quarante enfants (21 filles et 19 garçons) âgés en moyenne de cinq ans et quatre mois (de quatre ans et 11 mois à cinq ans et 11 mois) en décembre ont participé à cette étude. Ils sont scolarisés dans deux classes de grande section de maternelle d'une école de Grenoble. Tous les enfants appartiennent à des milieux socioéconomiques moyens. Quatre enfants ont été exclus de l'échantillon de départ, composé de 44 enfants, parce qu'ils n'ont pas pu participer aux deux sessions d'évaluation. Tous les enfants sont de langue maternelle française.

2.2. Passation

Après accord parental, les enfants étaient évalués individuellement dans une pièce de l'école isolée du bruit. Lors de la première session réalisée au mois de décembre, nous avons proposé une tâche de décodage de pseudomots, deux tâches d'habiletés métaphonémiques (identification de phonèmes en position initiale et finale dans les mots), une tâche de connaissance du son des lettres et enfin, nous avons recueilli deux scores de rapidité et deux scores de connaissance du nom des lettres (identification et dénomination). Cinq mois plus tard, lors de la seconde session, nous avons de nouveau proposé l'ensemble de la batterie d'évaluation.

2.3. Matériel et procédure

Nous avons choisi de travailler avec les lettres cursives de l'alphabet pour lesquelles les enfants prélecteurs et prescripteurs ne devraient pas, de fait, posséder une connaissance approfondie en début d'année. Mais, comme le préconise le *Bulletin officiel* du 19 juin 2008, en maternelle, les enfants « [...] apprennent progressivement le nom de la plupart des lettres de l'alphabet qu'ils savent reconnaître, en caractères d'imprimerie et dans l'écriture cursive, [...]. Pour une partie d'entre elles, ils leur associent le son qu'elles codent et le distinguent du nom de la lettre quand c'est pertinent. Les enfants découvrent ainsi le principe alphabétique, sans qu'il soit nécessaire de travailler avec eux toutes les correspondances ». Nous pensons donc pouvoir observer, plus facilement qu'avec les lettres capitales, l'évolution naturelle de la connaissance de ces lettres au cours des cinq mois de scolarisation. Concernant les épreuves qui évaluent les habiletés métaphonémiques et les capacités de décodage des enfants, nous avons choisi d'étudier les lettres *o*, *u*, *r*, *n*, *p* et *b* dont les fréquences relatives des phonèmes dans la langue française sont moyennes (*r* et *p*) à basses (*o*, *u*, *n* et *b*) (Rondal, 1997). De plus, nous avons choisi deux voyelles, deux consonnes de structure phonologique CV et deux consonnes de type VC.

2.3.1. Les tâches d'habiletés métaphonémiques

Pour chacune de ces tâches, des images en noir et blanc représentant des mots familiers et faciles à identifier sont présentées. Chaque tâche est précédée de trois essais avec feed-back afin de s'assurer que les enfants ont bien compris la consigne.

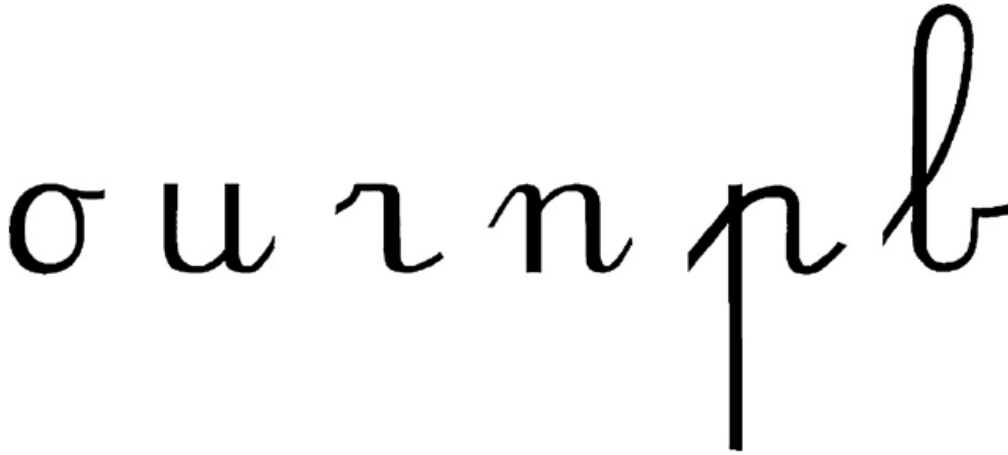


Fig. 1. Exemple de lettres cursives utilisées dans la tâche de dénomination (réduction de 50 % par rapport à la taille de présentation à l'écran).

2.3.1.1. Tâche d'identification de phonèmes en position initiale. Quatre images sont présentées à l'enfant. À chaque essai l'expérimentateur montre une première image, la pose sur la table et énonce le mot qu'elle représente. Ce premier mot est utilisé par l'enfant pour trouver parmi les trois autres images, celle qui correspond au mot qui commence par le même son. Par exemple : « orange » est le premier mot et l'enfant doit choisir parmi « mouton, olive, abeille ». Les différents essais portent sur les six phonèmes cibles de l'étude. Un point par réponse correcte est attribué (note sur 6).

2.3.1.2. Tâche d'identification de phonèmes en position finale. Le même principe est utilisé à la différence que l'enfant doit retrouver le mot qui finit par le même son que le mot présenté en premier. Par exemple l'expérimentateur présente le mot « vélo » et l'enfant doit choisir parmi les mots « chapeau, cerise, antenne ». On attribue un point par réponse correcte (note sur 6).

2.3.2. Les tâches de la connaissance du nom des lettres

L'ordre de passage concernant les épreuves de connaissance du nom des lettres et de connaissance du son des lettres était le même pour tous les enfants. Nous commençons par les tâches de dénomination du nom puis du son des lettres suivis par la tâche d'identification des lettres.

2.3.2.1. Tâche de dénomination des lettres cursives. Les 26 lettres cursives de l'alphabet (Fig. 1) sont présentées une à une sur un écran d'ordinateur dans un ordre aléatoire. Avant l'apparition de chaque lettre, on annonce à l'enfant qu'il devra dire le plus rapidement possible le nom de la lettre qui va apparaître à l'écran. Dès que l'enfant énonce le nom de la lettre, l'expérimentateur enregistre le temps de réponse en appuyant sur une clé réponse. Cette mesure fournit un indice de l'automatisation de l'utilisation de la connaissance du nom des lettres. Un temps de réponse est donc recueilli pour chacune des réponses correctes. Des temps de réponse moyens par enfant sont ensuite calculés pour les bonnes réponses pour les 26 lettres de l'alphabet (les temps de réponse moyens sont calculés à partir de trois réponses sur les 26 demandées). Pour la première session, nous avons choisi d'écarter les temps de réponse inférieurs à 300 millisecondes (ms) et supérieurs à 8850 ms (i.e., les temps respectivement inférieurs et supérieurs à trois écarts-types par rapport à la moyenne des temps de réponse de l'ensemble des participants). Pour la seconde session, nous

Author's personal copy

100

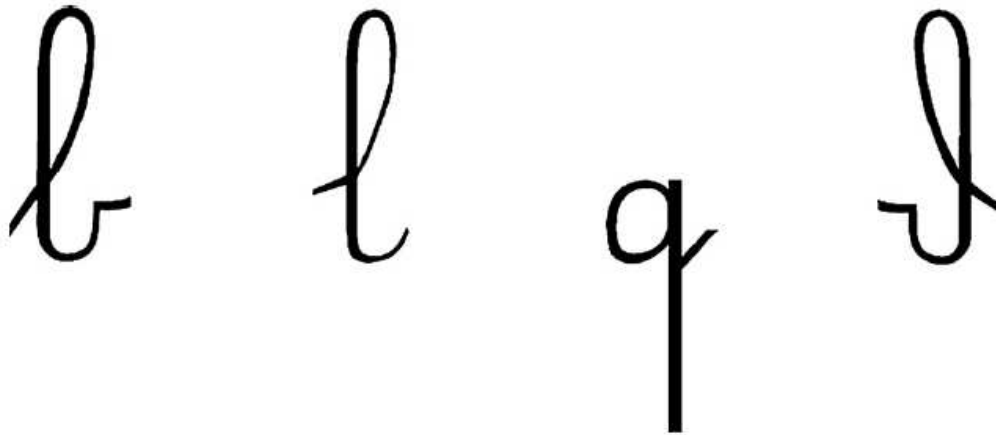
A. Hillairet de Boisferon et al. / *Psychologie française* 55 (2010) 91–111

Fig. 2. Exemple de lettres cursives utilisées dans la tâche d'identification de lettres (réduction de 35 % par rapport à la taille de présentation à l'écran).

avons choisi d'écarter les temps de réponse inférieurs à 300 ms et supérieurs à 6500 ms. Un score de précision de cette connaissance des lettres est aussi calculé. Un point est attribué par réponse correcte pour les 26 lettres de l'alphabet. Si l'enfant corrige sa première réponse, l'expérimentateur demande confirmation à l'enfant avant de considérer la réponse comme correcte ou incorrecte (en cas de correction de la réponse le temps de réponse n'est pas pris en compte).

2.3.2.2. Tâche d'identification des lettres cursives. L'expérimentateur énonce le nom des 26 lettres de l'alphabet une par une dans un ordre aléatoire. Pour chaque lettre énoncée, l'enfant doit indiquer, le plus rapidement possible, en pointant sur un écran d'ordinateur, la lettre qu'il a entendue. La lettre à identifier est représentée parmi trois autres lettres écrites en caractère cursif. À chaque essai, les lettres distractrices sont : la représentation en miroir de la lettre énoncée, une lettre graphiquement proche et une lettre graphiquement éloignée (Fig. 2)⁴. Chaque réponse correcte est notée un point. Si l'enfant corrige sa première réponse, l'expérimentateur demande confirmation à l'enfant avant de considérer la réponse comme correcte ou incorrecte (en cas de correction de la réponse le temps de réaction associé ne sera pas pris en compte). Un score pour les 26 lettres de l'alphabet est calculé. L'objectif de cette première mesure est donc d'obtenir un score de précision lié à la connaissance du nom des lettres. L'informatisation de la tâche, permet aussi de recueillir un temps de réaction, mesure de l'automatisme de l'accès à cette connaissance. En effet, dès la fin de l'annonce par l'expérimentateur de la lettre à pointer, les quatre lettres alignées apparaissent simultanément à l'écran et lorsque l'enfant pointe une lettre, l'expérimentateur enregistre le temps de réaction en appuyant sur une clé réponse. Un temps de réaction est donc recueilli pour chacune des réponses correctes pour les 26 lettres de l'alphabet. De la même manière que pour la tâche de dénomination, nous avons obtenu des temps réaction moyens pour les réponses correctes, par enfant, pour les 26 lettres. Pour la première session, nous avons choisi d'écarter les temps de réaction inférieurs à 500 ms et supérieurs à 9500 ms (i.e., les temps respectivement inférieurs et supérieurs à trois écarts-types par rapport à la moyenne des temps de réaction de

⁴ Les fréquences d'associations moyennes subjectives, sur la base de la similarité de la forme des lettres, était de $0,71 \pm 25$ pour les couples lettre énoncée/distracteur graphiquement similaire et de $0,09 \pm 0,09$ pour les couples lettre énoncée/distracteur graphiquement dissimilaire (d'après Chartrel, 2006).

Author's personal copy

A. Hillairet de Boisferon et al. / *Psychologie française* 55 (2010) 91–111

101

l'ensemble des participants). Pour la seconde session, nous avons choisi d'écarter les temps de réaction inférieurs à 500 ms et supérieurs à 10 000 ms.

2.3.3. Tâche de connaissance du son des lettres

Les six lettres cibles de l'étude sont de nouveau présentées dans un ordre aléatoire à l'enfant qui doit donner le son de la lettre s'il le connaît. Un point est attribué par réponse correcte (note sur 6).

2.3.4. Tâche de décodage de pseudomots

Les pseudomots sont composés uniquement des lettres cibles de l'étude. Il est précisé aux enfants que les mots sont inventés. Quatre des 12 pseudomots présentés sont composés de deux lettres (par exemple, /ro/), quatre de trois lettres (par exemple, /odu/) et quatre de quatre lettres (par exemple, /nubo/). Un point est attribué pour chaque pseudomot lu correctement (note sur 12).

3. Résultats

Nous analyserons, dans un premier temps, l'évolution des performances obtenues pour chacune des épreuves administrées entre les sessions de décembre et d'avril (*t* de Student). Ces analyses seront suivies d'analyses corrélationnelles (*r* de Bravais-Pearson) entre les différents indicateurs des compétences alphabétiques et métaphonémiques précoces, à la session de décembre et d'avril (mesures intrasession) et entre les sessions (mesures intersessions). Puis, nous examinerons les liens entre le niveau de décodage de pseudomots et les compétences alphabétiques et métaphonémiques. Nous présenterons alors les résultats des comparaisons (test *t* de Student) des performances des enfants, préalablement regroupés en fonction de leur niveau de décodage en avril, aux épreuves alphabétiques et métaphonémiques mesurées en décembre et en avril.

3.1. Évolution des performances de décembre à avril

Pour évaluer l'évolution des performances entre la première et la seconde session, nous avons effectué une série de test *t* de Student pour chacune des épreuves de la batterie d'évaluation. La plupart des tests sont significatifs (Tableau 1). Ainsi, à la session d'avril, les enfants obtiennent de meilleures performances, par rapport à la session de décembre, en lecture de pseudomots et en identification de phonème en position initiale et finale dans les mots. De même, ils identifient ou dénomment davantage de lettres en avril et les temps mis pour dénommer le nom des lettres sont aussi plus courts. Enfin, les enfants connaissent mieux le son des lettres en avril par rapport à décembre. Seuls les temps mis pour identifier les lettres à partir de leurs noms n'évoluent pas entre les deux sessions.

3.2. Analyses corrélationnelles intrasession

3.2.1. Les compétences alphabétiques et métaphonémiques précoces

Pour la session de décembre, nous constatons que toutes les performances aux tâches alphabétiques et métaphonémiques ne sont pas significativement corrélées (Tableau 2). Le pattern de résultats observé est le suivant. Les habiletés métaphonémiques, telles que mesurées par les tâches d'identification de phonème en position initiale et finale dans les mots, sont liées entre elles ($r = 0,52$; $p < 0,001$). Les scores de précision aux épreuves de la connaissance du nom des lettres

Tableau 1

Moyennes et écarts-types moyens par session pour chaque compétence évaluée.

Indices	Décembre		Avril		<i>p</i>
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	
<i>Pseudomots (/12)</i>	0,45	1,09	2,4	3,07	<0,001
<i>Identification de phonème (/12)</i>	7,48	2,54	9,28	1,96	<0,001
Phonème initial (/6)	4,3	1,42	4,95	0,99	<0,01
Phonème final (/6)	3,18	1,5	4,33	1,27	<0,001
<i>Identification lettres (/26)</i>	9,28	3,62	12,93	4,5	<0,001
TR identification (ms)	3246	901	3444	1169	0,36
<i>Dénomination lettres (/26)</i>	8,35	4,64	13,85	6,42	<0,001
TR dénomination (ms)	2546	637	2135	527	<0,01
<i>Son des lettres (/6)</i>	1,45	1,75	3,95	2,03	<0,001

TR : temps de réponse ; *p* : probabilité associée au test de la différence entre les moyennes de la session de décembre et d'avril (*t* de Student).

(dénomination et identification) le sont également ($r=0,77$; $p<0,001$). De plus, les scores correspondants aux deux tâches d'habiletés métaphonémiques sont chacun significativement corrélés aux scores correspondants aux deux tâches de la connaissance du nom des lettres. Le coefficient de corrélation moyen est de 0,43. Enfin, les scores de connaissance du son des lettres ne sont pas corrélés aux mesures d'habiletés métaphonémiques mais sont significativement corrélés aux scores de précision correspondants aux deux épreuves de la connaissance du nom des lettres (coefficient de corrélation moyen entre ces trois épreuves ; $r=0,61$). Les enfants qui possèdent une bonne connaissance du nom des lettres ont également tendance à bien connaître le son des lettres.

Pour la session d'avril, nous observons quasiment le même coefficient de corrélation entre les scores aux deux tâches d'habiletés métaphonémiques qu'en décembre ($r=0,51$; $p<0,001$). La corrélation entre les scores aux deux épreuves de la connaissance du nom des lettres est toujours significative mais différente de celle observée en décembre, passant de 0,77 à 0,49. Des modifications mineures sont aussi à noter pour les corrélations qui concernent l'épreuve de connaissance du son des lettres. Comme lors de la session de décembre, la connaissance du son des lettres est liée à la connaissance du nom des lettres (identification et de dénomination) avec un coefficient de corrélation moyen entre leurs scores qui passe de 0,61 à 0,475. Des variations plus importantes concernent le lien entre la connaissance du son des lettres et les habiletés métaphonémiques. Les scores à ces épreuves corréleront maintenant de manière significative. Plus précisément, nous obtenons des coefficients de corrélation de 0,41 avec les scores d'identification de phonème en position initiale, et de 0,54 avec les scores d'identification de phonèmes situés à la fin des mots. Enfin, les corrélations entre les scores aux tâches d'habiletés métaphonémiques et de la connaissance du nom des lettres ne sont plus significatives excepté pour les scores d'identification des lettres et d'identification de phonème en position finale dans les mots ($r=0,34$; $p<0,05$).

3.2.2. La connaissance du nom des lettres : précision et rapidité

À la session de décembre, les mesures de rapidité et de précision de la connaissance du nom des lettres ne sont pas corrélées. De même, les temps de dénomination et d'identification des lettres ne corréleront pas entre eux. À la session d'avril, seuls les scores de dénomination sont négativement corrélés à leurs temps de réponse ($r=-0,56$; $p<0,001$). Plus les enfants dénomment de lettres

Author's personal copy

Tableau 2
Corrélations intrasessions entre les scores aux différentes compétences alphabétiques et métaphonémiques.

Indices	1	2	3	4	5	6	7
1 Phonème initial (/6)	–	0,52***a	0,54***a	–	0,36**a	–	0,13 ^a
2 Phonème final (/6)	0,51***b	–	46***a	–	0,36**a	–	0,19 ^a
3 Identification lettres (/26)	0,26 ^b	0,34**b	–	–0,12 ^a	0,77***a	–	0,52***a
4 TR identification (ms)	–	–	0,03 ^b	–	–	0,26 ^a	–
5 Dénomination lettres (/26)	0,30 ^b	0,27 ^b	0,49***b	–	–	–0,16 ^a	0,69***a
6 TR dénomination (ms)	–	–	–	0,66***b	–0,56***b	–	–
7 Son des lettres (/6)	0,41**b	0,54***b	0,43***b	–	0,50***b	–	–

TR : temps de réponse ; * : significatif à $p < 0,05$; ** : significatif à $p < 0,01$; *** : significatif à $p < 0,001$.

^a Les intercorrélations pour la première session de décembre.

^b Les intercorrélations pour la session d'avril.

Tableau 3

Corrélations intersessions entre les scores aux différentes compétences alphabétiques et métaphonémiques.

Indices	1	2	3	4	5	6	7
1 Phonème initial (/6)	0,36*	0,43**	0,16	–	0,41**	–	0,35*
2 Phonème final (/6)	0,49***	0,47**	0,33*	–	0,35*	–	0,46**
3 Identification lettres (/26)	0,46**	0,49***	0,45**	–0,54***	0,63***	–	0,58***
4 TR identification (ms)	–	–	–0,11	0,15	–	–0,21	–
5 Dénomination lettres (/26)	0,50***	0,42**	0,55***	–	0,63***	–0,47**	0,57***
6 TR dénomination (ms)	–	–	–	–0,08	–0,04	–0,08	–
7 Son des lettres (/6)	0,27	0,28	0,30	–	0,63***	–	0,58***

TR : temps de réponse ; * : significatif à $p < 0,05$; ** : significatif à $p < 0,01$; *** : significatif à $p < 0,001$. Les indices en colonne correspondent à la session de décembre. Les indices en ligne correspondent à la session d'avril.

et plus ils le font rapidement. Enfin, les deux mesures de rapidité de la connaissance du nom des lettres sont maintenant corrélées ($r = 0,66$; $p < 0,001$).

3.3. Analyses corrélationnelles intersessions

3.3.1. Les compétences alphabétiques et métaphonémiques précoces

Pour chaque épreuve, le coefficient de corrélation calculé entre les scores de décembre et d'avril, est positif et significatif (de $r = 0,36$ à $r = 0,63$) (Tableau 3). De plus, comme nous l'avons vu précédemment les performances s'améliorent dans la période de cinq mois entre les sessions. Les enfants améliorent donc leurs performances entre décembre et avril pour l'ensemble des épreuves et la manière dont se classent les individus au sein des épreuves est proche pour ces deux périodes. Les performances aux épreuves mesurant les mêmes habiletés sont aussi corrélées entre décembre et avril. Les scores aux deux tâches d'habiletés métaphonémiques (en moyenne, $r = 0,46$) et les scores aux deux tâches de connaissance du nom des lettres (en moyenne, $r = 0,59$) sont respectivement liés. De manière plus intéressante, ces habiletés alphabétiques et métaphonémiques sont corrélées entre décembre et avril, avec quelques nuances toutefois. Les deux scores de connaissance du nom des lettres (identification et dénomination), mesurés en décembre, corrélaient de manière quasi équivalente avec les scores aux deux tâches d'habiletés métaphonémiques en avril (en moyenne, $r = 0,48$). Cependant, l'inverse n'est pas tout à fait vrai. En effet, les scores à la tâche d'identification de phonèmes en position initiale, mesurés en décembre, corrélaient uniquement avec les scores de dénomination de lettres en avril ($r = 0,41$; $p < 0,01$), alors que, pour les scores à la tâche d'identification de phonèmes en position finale en décembre, les coefficients de corrélation se révèlent positifs et significatifs pour les deux mesures de connaissance du nom des lettres en avril (en moyenne, $r = 0,34$). Enfin, les scores de connaissance du son des lettres, en décembre, corrélaient uniquement avec les scores de dénomination en avril ($r = 0,63$; $p < 0,001$). Cependant, l'ensemble des mesures de la connaissance du nom des lettres et des habiletés métaphonémiques, relevé en décembre, corrélaient avec les scores de connaissance du son des lettres en avril ($r = 0,35$ à $r = 0,58$), avec un coefficient de corrélation plus élevé pour les scores de connaissance du nom des lettres (en moyenne, $r = 0,575$) que pour les scores d'habiletés métaphonémiques (en moyenne, $r = 0,405$). Ce sont les enfants les plus capables de manipuler les phonèmes des mots parlés (habiletés métaphonémiques), de dénommer et d'identifier les lettres en décembre qui obtiennent les meilleures performances dans la tâche de connaissance du son des lettres en avril.

Author's personal copy

A. Hillairet de Boisferon et al. / Psychologie française 55 (2010) 91–111

105

Tableau 4

Moyennes et (écarts-types moyens) par session pour l'ensemble des compétences alphabétiques et métaphonémiques en fonction du niveau de décodage en avril.

Indices	Niveau de décodage de pseudomots en avril		<i>p</i>
	Non-décodeurs	Décodeurs	
<i>Décembre</i>			
Phonème initial (/6)	3,71 (1,36)	5,13 (1,19)	< 0,01
Phonème final (/6)	2,35 (1,22)	4 (1,51)	< 0,01
Identification lettres (/26)	6,94 (2,33)	11,73 (3,65)	< 0,001
TR identification (ms)	3234 (1171)	3177 (637)	0,87
Dénomination lettres (/26)	5,35 (2,76)	11,87 (4,44)	< 0,001
TR dénomination (ms)	2423 (668)	2561 (430)	0,51
Son des lettres (/6)	0,59 (0,8)	2,4 (2,23)	< 0,01
<i>Avril</i>			
Phonème initial (/6)	4,35 (1)	5,6 (0,74)	< 0,001
Phonème final (/6)	3,59 (1,12)	5,13 (1,06)	< 0,001
Identification lettres (/26)	10,47 (3,5)	14,67 (4,13)	< 0,01
TR identification (ms)	3893 (1354)	2965 (719)	< 0,05
Dénomination lettres (/26)	10,53 (5,75)	17,93 (5,46)	< 0,001
TR dénomination (ms)	2328 (615)	1941 (413)	0,056
Son des lettres (/6)	2,18 (1,67)	5,4 (0,74)	< 0,001

TR : temps de réponse ; *p* : probabilité associée au test de la différence entre les moyennes des décodeurs et non-décodeurs (*t* de Student).

3.3.2. La connaissance du nom des lettres : précision et rapidité

Les corrélations intersessions entre les scores de rapidité aux deux tâches de connaissance du nom des lettres ne sont pas significatives (voir diagonale du Tableau 3). De même, les temps d'identification de lettres ou de dénomination, mesurés en décembre, ne permettent pas d'estimer les scores de précision ni la rapidité d'identification ou de dénomination de lettres qui seront recueillis en avril. Enfin, nous obtenons des coefficients de corrélation négatifs et significatifs entre les différentes tâches de connaissance du nom des lettres, proposées en décembre et leurs mesures respectives de rapidité en avril (en moyenne, $r = -0,51$). Plus les enfants connaissent de noms de lettres en moyenne en décembre et plus celles-ci auront tendance à être reconnues rapidement en avril.

3.4. Analyse des liens entre compétences alphabétiques, métaphonémiques et décodage de pseudomots.

Afin d'étudier les liens entre les différentes compétences alphabétiques, métaphonémiques et les capacités de décodage, nous avons constitué deux groupes d'enfants sur la base de leurs performances en décodage de pseudomots mesurées en avril. Le groupe dit « décodeur » regroupe les 15 enfants qui ont obtenu les meilleurs scores (supérieurs à $Q_{(p=0,6)} = 2$) en décodage de pseudomots en avril ($M = 5,53 \pm 2,88$). Le groupe dit « non décodeur » regroupe les 17 enfants qui ont obtenu les moins bons scores ($Q_{(p=0,4)} = 0$) en décodage de pseudomots en avril ($M = 0$). Nous avons ensuite comparé les performances intrasession pour chaque épreuve entre le groupe d'enfants décodeurs et non décodeurs à l'aide de test *t* de Student (Tableau 4).

Nous commencerons par décrire les liens entre les différentes compétences alphabétiques et métaphonémiques mesurées en décembre et les capacités de décodage en avril. Nous observons

Author's personal copy

que les enfants décodeurs en avril obtiennent en décembre des performances d'habiletés métaphonémiques significativement supérieures aux enfants non décodeurs. Concernant le lien entre la connaissance du son des lettres et les capacités de décodage, nous observons qu'une bonne connaissance du son des lettres en décembre est suivie de bonnes compétences en lecture de pseudomots en avril. Autrement dit, les enfants décodeurs connaissent en décembre significativement plus de son de lettres que les enfants non décodeurs. Enfin, les enfants décodeurs en avril obtiennent dès décembre les meilleurs scores dans les épreuves de connaissance du nom des lettres. Ce sont pour les épreuves de dénomination et d'identification des lettres que nous notons les écarts de scores les plus importants entre les enfants décodeurs et non décodeurs. Les enfants décodeurs dénomment en moyenne 6,52 lettres de plus que les enfants non décodeurs et identifient en moyenne 4,79 lettres de plus. Cependant même si les enfants décodeurs ont un niveau de connaissance du nom des lettres supérieur à celui des non-décodeurs, cette différence ne se traduit pas encore par des temps de dénomination ou d'identification plus courts.

Nous allons maintenant analyser les liens entre les compétences alphabétiques et métaphonémiques mesurées en avril et les capacités de décodage mesurées au même moment. Comme précédemment, les enfants décodeurs en avril obtiennent des performances d'habiletés métaphonémiques significativement supérieures aux enfants non décodeurs. De même, le lien entre la connaissance du son des lettres en avril et la capacité de décodage à cette même période est confirmé par rapport à décembre. En avril, les enfants décodeurs connaissent significativement plus de son de lettres que les enfants non décodeurs. De plus, les enfants décodeurs en avril obtiennent aussi les meilleurs scores dans les épreuves de connaissance du nom des lettres. Ce sont de nouveau pour les épreuves de dénomination et d'identification des lettres que nous notons les écarts de scores les plus importants entre les enfants décodeurs et non décodeurs. Les enfants décodeurs dénomment en moyenne 7,4 lettres de plus que les enfants non décodeurs et identifient en moyenne 4,2 lettres de plus. Enfin, les enfants décodeurs, comparativement aux enfants non décodeurs, identifient les lettres plus rapidement. Cependant, cette différence n'est pas due à un gain significatif de rapidité des enfants décodeurs mais plutôt à l'association de ce gain à la légère augmentation des temps d'identification observée chez les enfants non décodeurs. Enfin, nous observons une tendance chez les enfants décodeurs à dénommer les lettres plus rapidement que les enfants non décodeurs.

Toutefois, afin d'étayer ces résultats, il est important de noter qu'il existe, selon le niveau de décodage des enfants, des différences intrasession entre les performances aux épreuves d'identification de phonème en position initiale et finale dans les mots et entre les performances aux épreuves de dénomination et d'identification. En effet, en décembre les enfants décodeurs ($t[13] = 4,22$; $p < 0,001$) et non décodeurs ($t[15] = 3,41$; $p < 0,01$) identifient davantage de phonèmes en position initiale dans les mots que de phonèmes en position finale. En avril, pour les enfants décodeurs, cette différence ne se révèle plus significative ($t[13] = 1,61$; $p = 0,13$) alors que les enfants non décodeurs identifient toujours davantage de phonèmes en position initiale dans les mots que de phonèmes en position finale ($t[15] = 2,35$; $p < 0,05$). Cette différence de profils en avril semble être due au nombre plus important de performances plafond atteint dans les tâches d'identification de phonèmes en position initiale ou finale par les enfants décodeurs (respectivement, 11/15 et 7/15) par rapport aux enfants non décodeurs (respectivement, 3/17 et 1/17). Les résultats les plus intéressants concernent les épreuves de la connaissance du nom des lettres. Pour le groupe « décodeurs », les performances de dénomination sont quasiment équivalentes aux performances d'identification de lettres en décembre ($t[13] = 0,21$; $p = 0,84$) mais significativement supérieures en avril ($t[13] = 3,44$; $p < 0,01$). Pour le groupe « non décodeurs » nous observons le pattern suivant : les enfants identifient davantage de lettres en décembre qu'ils

n'en dénomment ($t[15] = 2,35$; $p < 0,05$) puis en avril les performances deviennent similaires pour les deux épreuves ($t[15] = 0,05$; $p = 0,96$). Enfin, concernant les temps de réponses associés aux tâches de connaissance du nom des lettres, nous observons que seules les vitesses de dénomination augmentent entre décembre et avril et uniquement pour les enfants décodeurs ($t[13] = 3,68$; $p < 0,01$).

4. Discussion

Cette étude réalisée chez des enfants prélecteurs scolarisés en grande section de maternelle, a permis d'observer deux grands ensembles de résultats. Le premier concerne les liens entre les différentes compétences alphabétiques et métaphonémiques, considérées comme précurseurs des futures habiletés en lecture, mesurées en décembre et avril de la même année scolaire. Nous nous sommes attachés à identifier les connections entretenues par les habiletés métaphonémiques (identification de phonème en position initiale et finale dans les mots) et la connaissance du nom (identification et dénomination) et du son des lettres.

En premier lieu, nous observons que les performances aux tâches de conscience métaphonémique sont corrélées à celles évaluant la connaissance du nom des lettres en décembre, ce qui n'est quasiment plus le cas en avril. De plus, la connaissance du nom des lettres en décembre semble davantage liée aux habiletés métaphonémiques en avril que ne sont liées les habiletés métaphonémiques en décembre à la connaissance du nom des lettres en avril. Ce pattern de résultats indique qu'au début de l'apprentissage du système alphabétique, les habiletés métaphonémiques pourraient se développer en s'appuyant sur la connaissance des premiers types d'associations arbitraires entre écrit et oral, en l'occurrence, l'association entre la lettre et son nom (Morais et al., 1986 ; Read et al., 1986). Puis, au cours de la scolarisation, la conscience phonémique se développerait plus directement en lien avec l'apprentissage de la lecture et notamment celui des associations lettre-son.

Concernant les liens entretenus par la connaissance du son des lettres et la conscience phonémique, nous observons des corrélations significatives uniquement en avril. L'absence de lien significatif entre ces variables en décembre pourrait, a priori, tout comme l'absence de lien significatif entre la connaissance du son des lettres en décembre et les habiletés métaphonémiques en avril, être attribuée à des performances très faibles puisque peu de sons sont rapportés par la majorité des enfants en décembre ($M = 1,45 \pm 1,75$). Néanmoins, nous observons dès décembre une importante corrélation entre les scores de connaissance du son et du nom des lettres. Comme le démontre Share (2004), la connaissance du son des lettres pourrait être favorisée par l'apprentissage préalable du nom des lettres. Dans les premiers temps de la scolarisation, les lettres sont le plus souvent présentées par leur nom (un nom pour une lettre) plutôt que par leur son (pas de correspondance unique lettre-son). Les enfants qui connaissent donc préférentiellement le nom des lettres en début d'année pourraient utiliser cette connaissance pour deviner leur son (Treiman et Kessler, 2003), à la condition que le son soit contenu dans le nom. Dans ce sens, connaître un nombre important de sons en début d'année serait plutôt le fait d'enfants possédant également de bonnes capacités de dénomination des lettres en décembre et avril.

Ces premiers résultats corrélationnels semblent confirmer le statut particulier de la connaissance du nom des lettres dans l'apprentissage initial de la langue écrite. Elle semble à la fois en lien avec le développement des habiletés métaphonémiques et avec l'acquisition des associations lettres-sons.

Pour préciser le développement de la connaissance du nom des lettres, nous avons proposé, en plus des mesures de précision de cette connaissance, des mesures d'automatisation de son

Author's personal copy

utilisation. Les temps de réaction moyens associés aux dénominations correctes de lettres ne sont pas corrélés aux scores moyens de précision avant la fin d'année. C'est lorsque que les enfants connaissent suffisamment de lettres qu'une certaine rapidité d'utilisation de cette connaissance peut être observée. De plus, il semblerait que ce sont les enfants qui dénomment ou identifient le plus de lettres en décembre qui le feront aussi le plus rapidement en avril. L'automatisation de l'accès à cette connaissance serait donc liée à un certain niveau de son développement. Bien que le recueil de temps de réaction permette d'évaluer plus précisément l'automatisme de l'activation des représentations des lettres, le recours à la tâche d'identification pourrait se révéler moins pertinent. En effet, pour réaliser cette tâche, d'autres facteurs, notamment l'exploration visuelle organisée et attentive du matériel, ou encore le fait de devoir pointer avec le doigt les lettres, pourrait influencer la mesure de rapidité. La question qui se pose alors est celle de l'utilisation d'une tâche d'identification comme mesure satisfaisante de la qualité du développement de la connaissance du nom des lettres.

Le second ensemble de résultats concerne les liens entre les compétences alphabétiques et métaphonémiques et les capacités de décodage en avril. La comparaison des performances entre le groupe d'enfants décodeurs et non décodeurs en avril montre que les enfants qui obtiennent les meilleurs scores en décodage de pseudomots possèdent aussi les meilleures habiletés métaphonémiques en décembre et en avril. Le même pattern est observé, lorsqu'on considère le lien entre la connaissance du son des lettres et le décodage de pseudomots. Les meilleurs scores de connaissance du son des lettres en décembre et en avril sont obtenus par les enfants décodeurs. Concernant le lien entre la connaissance du nom des lettres et le décodage de pseudomots, nous avons constaté que les enfants décodeurs identifiaient et dénommaient davantage de lettres en décembre et en avril par rapport aux enfants non décodeurs. De plus, c'est sur la connaissance du nom des lettres que les deux groupes d'enfants se différencient le plus dès décembre avec un net avantage pour les enfants décodeurs. Nous pouvons donc supposer que la connaissance du nom des lettres favorise directement la découverte des correspondances graphème-phonème, notamment parce que la plupart des lettres contient dans leur nom le phonème qu'il représente (23 des 26 lettres de l'alphabet en français). Ce résultat est toutefois différent de celui [Schatschneider et al. \(2004\)](#) qui montrait que le lien entre connaissance du nom des lettres et la lecture diminuait dès la fin de la grande section de maternelle. L'utilisation de lettres cursives plutôt que capitales, pour les épreuves de dénomination et d'identification, éviterait un trop grand nombre de performances plafonds dans notre étude.

En prenant en compte l'ensemble des résultats concernant les liens entre les compétences alphabétiques et métaphonémiques et les capacités de décodage en avril, ainsi que les liens entre les compétences alphabétiques et métaphonologiques, nous proposons le schéma suivant : la connaissance du nom des lettres permettrait à la conscience phonémique de se développer puis influencerait l'apprentissage des associations lettres-sons. Au début de l'apprentissage, la connaissance du nom des lettres pourrait donc via l'amélioration des habiletés métaphonémiques et de la connaissance du son des lettres influencer indirectement le niveau de lecture.

Concernant l'étude du lien entre la rapidité de l'utilisation de la connaissance du nom des lettres et les capacités de décodage en avril, la comparaison des performances des enfants décodeurs et non décodeurs n'a pas permis de mettre en évidence l'existence de ce lien. Nous observons uniquement que la vitesse moyenne de dénomination augmente entre décembre et avril pour les enfants décodeurs. Il semblerait donc que le recueil d'un temps de réaction soit plus pertinent pour évaluer précisément la connaissance des lettres que pour prédire les futures performances en décodage. De plus, les différences observées entre les épreuves de dénomination et d'identification de lettres reposent la question de la manière de mesurer le processus de reconnaissance rapide des lettres.

Author's personal copy

A. Hillairet de Boisferon et al. / *Psychologie française* 55 (2010) 91–111

109

En effet, la tâche de dénomination consiste en la présentation d'éléments discrets alors que la tâche d'identification proposerait des informations simultanées (plusieurs lettres présentées en même temps à l'écran). Cette différence méthodologique a été étudiée en comparant l'importance du RAN et de mesures de dénomination rapide discrète dans les compétences en lecture (Bowers et Swanson, 1991). Les résultats indiquent que ces deux mesures d'automatisme semblent importantes dans l'activité de lecture, mais que des épreuves telles que le RAN permettraient de mieux détecter les mauvais lecteurs. De plus, il faut noter que dans de nombreuses recherches, le RAN a souvent été fortement associé à des mesures de temps de lecture et plus rarement aux mesures associées de précision de cette lecture. Dans ce cadre, la fluence en lecture pourrait être considérée comme une extension de la dénomination rapide (Schatschneider et al., 2002) et la dénomination rapide comme un moyen de prédire la fluence de la lecture. Dans ce sens, Bonnefoy et Rey (2008) ont montré que les temps de dénomination de lettres isolées expliquent, au CP, une part de variance unique du temps de lecture de mots. Cependant, une lecture fluente, bien que correspondant à un décodage rapide, implique aussi un décodage précis des mots. Dans notre étude, nous ne nous sommes pas intéressés aux mesures de rapidité de la lecture mais davantage à une mesure de précision du décodage. En fin de grande section de maternelle, avant l'entrée dans l'apprentissage formel, il semble plus pertinent de s'intéresser à la précision du décodage en cours d'acquisition plutôt qu'à une mesure de son automatisisation. Contrairement à nos hypothèses, nous n'avons pas observé de lien entre la précision du décodage en avril et les temps de dénomination ou d'identification des lettres. Toutefois, avant de parvenir à une lecture fluente, l'ensemble des processus intervenant dans cette activité doivent eux-mêmes être précis et rapides (Wolf et Katzir-Cohen, 2001). C'est pourquoi, et au regard de nos résultats, nous conseillons particulièrement de prendre en compte, en plus des mesures de précision, des mesures de rapidité d'accès aux représentations des lettres, notamment la vitesse de dénomination du nom des lettres, compétence clé au début de l'acquisition de la lecture.

En conclusion, cette étude confirme l'importance, dans les premiers temps de l'apprentissage de la lecture, des habiletés métaphonémiques, de la connaissance du son des lettres et principalement de la connaissance du nom des lettres. Nous avons privilégié l'hypothèse de Laberge et al., (1974), selon laquelle, l'efficacité des différents processus impliqués dans la lecture dépend non seulement de leur précision mais également de leur automatisisation. Dans ce sens, la connaissance du nom des lettres mais aussi la capacité à les dénommer rapidement semble être deux éléments importants pour l'acquisition de la lecture. Dans ce cadre, nous pensons que des interventions centrées sur l'apprentissage des compétences alphabétiques et métaphonémiques précoces, plus particulièrement sur la connaissance des lettres sont fondamentales pour favoriser l'apprentissage de la lecture. Enfin, pour mieux comprendre les mécanismes sous-jacents de l'apprentissage de la lecture, il est important de prendre en compte une mesure d'automatisation de la connaissance des lettres.

Conflit d'intérêt

Aucun.

Remerciements

Nous remercions la directrice et enseignantes de l'école maternelle Jean-Jaurès (Grenoble), les enfants et leurs parents pour leur participation à cette étude. Ce travail a bénéficié du soutien financier du Centre national de la recherche scientifique et de l'université Pierre-Mendès France (Grenoble II).

Références

- Bonnefoy, B., Rey, A., 2008. Automatisation de la connaissance des lettres chez l'apprenti lecteur. *L'Année psychologique* 108, 187–206.
- Bowers, P.G., Swanson, L.B., 1991. Naming speed deficits in reading disability: multiple measures of a singular process. *Journal of Experimental Child Psychology* 51, 195–219.
- Bradley, L., Bryant, P.E., 1991. Phonological skills before and after learning to read. In: Brady, S.A., Shankweiler, D.P. (Eds.), *Phonological processes in literacy: a tribute to Isabelle Y. Liberman*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ, pp. 37–46.
- Bus, A.G., Van Ijzendoorn, M.H., 1999. Phonological awareness and early reading: a meta-analysis of experimental training studies. *Journal of Educational Psychology* 91, 403–414.
- Byrne, B., Fielding-Barnsley, R., 1990. Acquiring the alphabetic principle: a case of teaching recognition of phoneme identity. *Journal of Educational Psychology* 82, 805–812.
- Byrne, B., Fielding-Barnsley, R., 1991. Evaluation of a program to teach phonemic awareness to young children. *Journal of Educational Psychology* 83, 451–455.
- Carroll, J.M., 2004. Letter knowledge precipitates phoneme segmentation, but not phoneme invariance. *Journal of Research in Reading* 27 (3), 212–225.
- Carroll, J.M., Snowling, M., Hulme, C., Stevenson, J., 2003. The development of phonological awareness in preschool children. *Developmental Psychology* 39, 913–923.
- Casalis, S., Louis-Alexandre, M., 2000. Morphological analysis, phonological analysis and learning to read French: a longitudinal study. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal* 12, 303–335.
- Castles, A., Coltheart, M., 2004. Is there a causal link from phonological awareness to success in learning to read? *Cognition* 91, 77–111.
- Castles, A., Holmes, V.M., Neath, J., Kinoshita, S., 2003. How does orthographic knowledge influence performance on phonological awareness tasks? *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 56 (3), 445–467.
- Chartrel, E., 2006. Reconnaissance et écriture de lettres cursives : une approche développementale. Thèse de doctorat. Université de Bourgogne.
- Colé, P., Sprenger-Charolles, L., 1999. Traitement syllabique au cours de la reconnaissance de mots écrits chez des dyslexiques, lecteurs en retard et normo-lecteurs de 11 ans de différents niveaux d'expertise en lecture. *Revue de neuropsychologie* 2–3, 323–361.
- Cormier, P., 2006. Connaissance du nom des lettres chez des enfants francophones de 4, 5 et 6 ans au Nouveau-Brunswick. *Éducation et francophonie* 34, 5–27.
- De Abreu, M.D., Cardoso-Martins, C., 1998. Alphabetic access route in beginning reading acquisition in Portuguese: the role of letter-name knowledge. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal* 10, 85–104.
- Denckla, M.B., Rudel, R.G., 1974. Rapid “automatized” naming of pictured objects, colors, letters, and numbers by normal children. *Cortex* 10, 186–202.
- Ecalte, J., 2004. Les connaissances des lettres et l'écriture du prénom chez l'enfant français avant l'enseignement formel de la lecture-écriture. *Psychologie canadienne* 45 (1), 111–118.
- Ecalte, J., Magnan, A., Biot-Chevrier, C., 2008. Alphabet knowledge and early literacy skills in French beginning readers. *European Journal of Developmental Psychology* 5 (3), 303–325.
- Ehri, L.C., Wilce, L.S., 1985. Movement into reading: is the first stage of printed word reading visual or phonetic? *Reading Research Quarterly* 20, 163–179.
- Evans, M.A., Bell, M., Shaw, D., Moretti, M., Page, J., 2006. Letter names, letter sounds and phonological awareness: an examination of kindergarten children across letters and of letters across children. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal* 19 (9), 959–989.
- Foulin, J.N., 2007. La connaissance des lettres chez les prélecteurs : aspects pronostiques, fonctionnels et diagnostiques. *Psychologie française* 52 (4), 431–444.
- Hulme, C., Caravolas, M., Malkova, G., Brigstocke, S., 2005. Phoneme isolation ability is not simply a consequence of letter-sound knowledge. *Cognition* 97, B1–B11.
- Laberge, D., Samuels, S.J., 1974. Toward a theory of automatic information processing in reading. *Cognitive Psychology* 6, 293–323.
- Levin, I., Shatil-Carmon, S., Asif-Rave, O., 2006. Learning of letter names and sounds and their contribution to word recognition. *Journal of Experimental Child Psychology* 93 (2), 139–165.
- Manis, F.R., Doi, L.M., Bhadha, B., 2000. Naming speed, phonological awareness, and orthographic knowledge in second graders. *Journal of Learning Disabilities* 33, 325–333.

Author's personal copy

A. Hillairet de Boisferon et al. / *Psychologie française* 55 (2010) 91–111

111

- Manis, F.R., Seidenberg, M.S., Doi, L.M., 1999. See Dick RAN: rapid naming and the longitudinal prediction of reading subskills in first and second graders. *Scientific Studies of Reading* 3 (2), 129–157.
- McBride-Chang, C., 1999. The ABC's of the ABC's: the development of letter-name and letter-sound knowledge. *Merrill-Palmer Quarterly* 45, 278–301.
- Morais, J., Bertelson, P., Cary, L., Alegria, J., 1986. Literacy training and speech segmentation. *Cognition* 24, 45–64.
- Morais, J., Cary, L., Alegria, J., Bertelson, P., 1979. Does awareness of speech as a sequence of phones arise spontaneously. *Cognition* 7, 323–331.
- Muter, V., Hulme, C., Snowling, M., Taylor, S., 1998. Segmentation not rhyming predicts early progress in learning to read. *Journal of Experimental Child Psychology* 71, 3–27.
- Ramus, F., 2003. Developmental dyslexia: specific phonological deficit or general sensorimotor dysfunction? *Current Opinion in Neurobiology* 13, 212–218.
- Read, C., Zhang, Y., Nie, H., Ding, B., 1986. The ability to manipulate speech sounds depends on knowing alphabetic writing. *Cognition* 24, 31–34.
- Rondal, J.A., 1997. L'évaluation du langage. Mardaga, Liège.
- Ross, S., Treiman, R., Bick, S., 2004. Task demands and knowledge influence how children learn to read words. *Cognitive Development* 19, 417–431.
- Scarborough, H.S., 1998. Early identification of children at risk for reading disabilities: phonological awareness and some other promising predictors. In: Shapiro, B.K., Accardo, P.J., Capute, A.J. (Eds.), *Specific reading disability: a view of the spectrum*. York Press, Timonium, MD, pp.75–119.
- Schatschneider, C., Carlson, C.D., Francis, D.J., Foorman, B.R., Fletcher, J.M., 2002. Relationship of rapid automatized naming and phonological awareness in early reading development: implications for the double-deficit hypothesis. *Journal of Learning Disabilities* 35, 245–256.
- Schatschneider, C., Fletcher, J.M., Francis, D.J., Carlson, C.D., Foorman, B.R., 2004. Kindergarten prediction of reading skills: a longitudinal comparative analysis. *Journal of Educational Psychology* 96, 265–282.
- Scott, J., Ehri, L., 1990. Sight word reading in prereaders: use of logographic vs. Alphabetic access routes. *Journal of Reading Behavior* 22, 149–166.
- Share, D.L., 2004. Knowing letter names and learning letter sounds: a causal connection. *Journal of Experimental Child Psychology* 88, 213–233.
- Treiman, R., Broderick, V., 1998. What's in a name: children's knowledge about the letters in their own names. *Journal of Experimental Child Psychology* 70 (2), 97–116.
- Treiman, R., Kessler, B., 2003. The role of letter names in the acquisition of literacy. In: Kail, R.V. (Ed.), *Advances in child development and behavior*. Academic Press, San Diego, pp.105–135.
- Treiman, R., Tincoff, R., Richmond-Welty, E.D., 1996. Letter names help children to connect print and speech. *Developmental Psychology* 32, 505–514.
- Watson, C., Willows, D.M., 1995. Information-processing patterns in specific reading disability. *Journal of Learning Disabilities* 28, 216–231.
- Wolf, M., Bally, H., Morris, R., 1986. Automaticity, retrieval processes and reading: a longitudinal study in average and impaired readers. *Child Development* 57, 988–1000.
- Wolf, M., Katzir-Cohen, T., 2001. Reading fluency and its intervention. *Scientific Studies of Reading* 5 (3), 211–239.
- Wolf, M., Miller, L., Donnelly, K., 2000. Retrieval, automaticity, vocabulary elaboration, orthography (RAVE-O): a comprehensive, fluency-based reading intervention program. *Journal of Learning Disabilities* 33, 375–386.

G. Article 3 : Palluel-Germain, Bara, Hillairet de Boisferon, Hennion, Gouagout, & Gentaz (2007)

Palluel-Germain, R., Bara, F., Hillairet de Boisferon, A., Hennion, B., Gouagout, P., & Gentaz, E. (2007). A visuo-haptic device - Telemaque - increases the kindergarten children's handwriting acquisition. IEEE WorldHaptics, 72-77.

A Visuo-Haptic Device - Telemaque - Increases Kindergarten Children's Handwriting Acquisition

R. Palluel-Germain^{*}
B. Hennion[†]

F. Bara[†]
P. Gouagout[†]

A. Hillairet de Boisferon^{**}
E. Gentaz^{**}

(^{*})Moss Rehabilitation Research Institute, Philadelphia, USA

([†])Department of Educational Sciences, Sherbrook University, Canada

(^{**})Psychology and Neurocognition Laboratory, CNRS UMR-5105, Grenoble II, France

([‡])FranceTelecom Division Research Development, Grenoble, France

E-mail: germainr@einstein.edu, anne.hillairet@upmf-grenoble.fr, edouard.gentaz@upmf-grenoble.fr

Abstract

The objective of the present research was to show that incorporating a visuo-haptic device 'Telemaque' may increase the fluency of handwriting production of cursive letters in kindergarten children i.e., before formal handwriting learning begins. Forty two 5 year-old children were assigned an intervention involving either Telemaque (experimental training; VH group) or not (control training; C group). The fluency of handwriting was tested before and after both interventions. Fluency was analysed by kinematic parameters: Average velocity, number of velocity peaks, and number of breaks during the production of six cursive letters (a,b,f,i,l,s). The results showed that the fluency of handwriting production for all letters was higher after the VH training than after the C training: The movements were faster, exhibited less velocity peaks and children lifted the pen less often during the letter production. These results showed that the Telemaque device may help kindergarten children to increase the proactive strategy to control handwriting movements.

1. Introduction

This study examined the effects of incorporating a visuo-haptic device -named Telemaque- in a training program designed to develop handwriting acquisition among pre-handwriting kindergarten children. Handwriting acquisition consists in learning the visual representations of letters, which are used to guide their production, and the motor representations specific to each one. This acquisition is generally slow and difficult: Several years of formal instruction are necessary before young children master this skill [1, 2] and differentiate the path for writing and the path for

drawing (they copy letters according to a model) [3, 4]. Although handwriting acquisition begins upon entry into school, handwriting skills become satisfactory only by the end of primary school. Handwriting gradually changes during learning [5, 6]. From grade 1 to grade 3, quality and speed improve steadily with age and schooling. After grade 4, a decrease in legibility and an increase in speed were observed. The developmental changes in the product and the process of handwriting could be the consequence of a change from retroactive control of movement (based on sensorial, visual and kinaesthetic feedback) to proactive control (based on an internal representation of motor acts) [1]. Indeed, at the beginning of learning, movements are slow and guided by visual and kinaesthetic feedback. With practice, writing becomes automatic and the control of movement is mostly proactive.

We argued that there is a crucial interest to understand and propose some assessment methods in order to improve this learning acquisition. Indeed, studies revealed strong links between handwriting of single letters and both reading acquisition and spelling skills [7, 8, 9, 10, 11]. Thus, handwriting plays an important role in literacy acquisition: Children must develop enough fluency so that the mechanisms of producing text do not interfere with the processes of composing and spelling. When the low-level processes of handwriting become automatic, working memory resources are freed up for the constructive high level aspects of composing [12, 13]: If the writer has to pay considerable attention to the motor constraints of handwriting, planning and text generation will be disrupted.

A way of teaching handwriting is to explain the form and the order of letter strokes in addition to copying exercises [14, 15, 16]. Children must be able to both perceive the shape of the model and evaluate

the deviation between their own handwriting product and the standard. In addition, if the process of handwriting acquisition is -at least partially- the consequence of a change from retroactive control of movement to proactive control [1] exercises developing proactive strategies would increase this skill.

Therefore, we propose that a good way to improve handwriting acquisition is to provide a letter standard that is not only static (the shape) but also dynamic (rules of motor production) in order to help children to increase the proactive strategy to control handwriting movements. Consequently, we developed an original ergonomic visuo-haptic device, named *Telemaque* [17], involving a force-feedback programmable pen. This device permitted to teach children how to reproduce a letter according to a correct shape and also to a correct movement. The kinematics applied to *Telemaque* was built according to the rules of motor production described by Viviani [18], and Lacquaniti, Terzuolo, and Viviani [19]: (1) There is a proportional and direct relationship, called *isochrony*, between the trajectory length and movement velocity (whatever the size of a letter, the time taken to write it remains constant); (2) Handwritten letters keep their spatial characteristics even if the size of the letter changes (the shape remains the same whatever the size); (3) Shape determines the movement dynamic, called the two-thirds power law. It means that the tangential velocity and the curvature of the trajectory are inversely related in a manner specified by this law. In a preliminary study [20] we evaluated the effects of the *Telemaque* device on twenty-two first grade children (6 years-old). Results showed that the movement time and the number of velocity peaks during the handwriting production of four cursive letters (*b, f, k, s*) decreased more after training involving *Telemaque* than after classical control training (without *Telemaque*).

The first objective of the present study was to show that incorporating this visuo-haptic device may also increase the fluency of handwriting production in kindergarten children i.e., before formal handwriting learning begins. Fluency was analysed by kinematic parameters: Average velocity, number of velocity peaks, and number of breaks during the letters production. The second objective was to examine the effects of *Telemaque* with a larger number of children (forty-two) and letters (six) than in our first study [20]. Consequently, in order to show that the *Telemaque* device may help kindergarten children increase the proactive strategy to control handwriting movements, we used a classical training design on 5-year-old children. The fluency of handwriting was tested before and after an intervention involving *Telemaque* (experimental training) or not (control training).

2. Method

2.1. Participants

Forty-two children between the ages of 5;1 and 6;1 months at the beginning of the study (20 boys and 22 girls, $M=5;5$) from a preschool in Grenoble participated in this study. All participants spoke French as their first language and no child had a statement of special educational needs. Permission for recruitment was gained from the head teacher of the school, and written informed consent for the participation of the children was obtained from their parents.

2.2. Material and procedure

2.2.1. Pre- and post-tests. Between 1 and 2 weeks before and after the training intervention, children were individually assessed in order to measure their handwriting performances. These two sessions were carried out by the same experimenter. Children were seated comfortably in front of a table, upon which a digital tablet (Wacom®) was placed. In this measuring system, the positions of the pen were sampled at a frequency of 50 Hz and at a spatial resolution of about 0.1 mm. The pen used in order to write on the tablet was a ball-point pen (Intuos Ink Pen, Wacom®) allowed to receive feedback of the written samples. A white paper was placed on the digital tablet. After a familiarization phase in which we asked children to write on the paper their name and to produce a drawing, we asked them to copy six cursive letters (*a, b, f, i, l, s*). These letters were chosen in accordance with the teachers and in order to have some "difficult" letters (e.g., *f*) and some easier ones (e.g., *l*). Each letter was presented separately on a paper placed in front of the child. There were no time and size constraints. The order of letter presentation was counterbalanced across participants. Each test lasted approximately 15 min.

A large number of quantitative and qualitative measures may assess handwriting production. However, because *Telemaque* was built in order to improve the fluency of movement, we based our measures only on kinematic parameters. In addition, some computerized studies showed that the differences between children with and without handwriting difficulties lie not only in the written products, but also in the dynamics of handwriting performance [21, 22, 23, 24]. According to these studies, the main temporal and spatial features that differentiate the handwriting process of poor writers from proficient writers include movement velocity, pauses at greater frequencies and a lack of continuity and fluency. Therefore, we have calculated for each letter production, the mean movement velocity, the number of velocity peaks and the number of breaks during execution. We expected that the movement production would be more rapid and would present less

velocity peaks and breaks after the intervention involving Telemaque than after the control intervention (without Telemaque).

2.2.2. Training sessions. Two equivalent groups of 21 children each were formed using the criteria of handwriting performances. Therefore, twenty one children were assigned to the Visuo-Haptic (VH) intervention and twenty one to the Control (C) intervention. An intervention consisted of 6 training sessions (one per week). A specific letter (*a, b, f, i, l, s*) was learned in each session. Consequently, the intervention took 6 weeks. In each session, children were asked to perform four exercises which were proposed in a counterbalanced order across subjects. These exercises lasted approximately 20 min. Two exercises were common to the two interventions. In the first exercise, children were asked to colour the target letter represented with two borders. In the second exercise, children were asked to make a 4-piece jigsaw puzzle that represented the target letter. The size and the shape of the letter were the same in the two exercises and the same as the one produced by Telemaque (see Table 1). The two exercises specific to each intervention are described below.

Table 1. Size (in mm) of the letters produced by Telemaque in *x* (horizontal) and *y* (vertical).

Letter	Size (mm)		Letter	Size (mm)	
	<i>x</i>	<i>y</i>		<i>x</i>	<i>y</i>
<i>a</i>	24	25	<i>i</i>	20	35
<i>b</i>	20	75	<i>l</i>	18	75
<i>f</i>	20	123	<i>s</i>	17	22

2.2.2.1. The two specific exercises of the visuo-haptic (VH) intervention In the VH intervention, children were comfortably seated in front of a table and were asked to hold a pen (14 cm in high) in a “natural” way. This pen was attached to a force-feedback arm (Phantom[®]) controlled by a software (see Fig.1). This working station is named Telemaque.



Fig. 1. Global and schematic view of the Telemaque working station. Children were seated in front of a table upon which the letters generated by the visuo-haptic interface were displayed on a horizontal computer screen. Children had to hold a pen attached to force-feedback arm controlled by the Telemaque software.

The letters generated by the visuo-haptic interface were displayed on a horizontal computer screen (30 cm X 22 cm). The distance between the child chest and the horizontal screen displaying the letters was constant across participants. It is to note that the pen never touched the video screen but was maintained approximately at a distance of 1.5 cm. After a familiarisation phase in which we asked children to write their name and to produce a drawing which appeared in real time on the computer screen, each child performed two exercises generated by Telemaque: the circuit game and the dynamical tracing of letters. The order of these two exercises was counterbalanced across subjects.

The circuit game. This exercise was focused on the “correct” order of a letter production. In this exercise, a letter appeared with two borders representing a road on the computer screen (see Fig. 2). Children hold the Telemaque pen and were asked to stay between the two borders. The line produced by the child appeared in real time on the screen. A force generated by Telemaque attracted the pen on the correct direction if the child veered off the correct trajectory or did not produce the letter in a correct order. In this case, the pen was attracted towards the nearest point of the letter, perpendicularly to the curve. This force was progressively reduced during the exercise. Each child executed 10 trials for each letter. For the first four trials, the strength was equal to 500g/cm. For the next two trials, the strength was 250g/cm, and it was 125g/cm for the seventh and the eighth trial. Finally for the last ones, no strength was applied. The size of the letters

produced by Telemaque and projected on the computer screen is indicated in Table 1. The distance between the two borders was 0.8 cm.

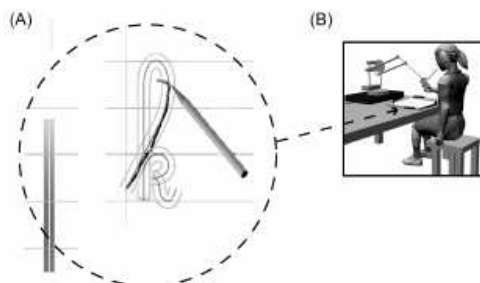


Fig. 2. The circuit game. (A) A letter appeared with two borders representing a road on the computer screen. (B) The child held a pen - represented on the video screen by a lead pencil- attached to a force-feedback arm. Children were asked to stay between the two borders. A force generated by Telemaque attracted the pen on the correct direction if the child veered off his production on the correct trajectory or did not produce the letter in a correct order.

The dynamic tracing of letters. This exercise was precisely dedicated to the dynamical aspect of handwriting. In it, children held the pen, a letter appeared on the video screen and the pen moved "alone". The size of the letters produced by Telemaque and projected on the computer screen is indicated in Table 1. The dynamical font was used here to drive the pen at the right place in the right time in a natural way (Fig. 3): The movement generated by Telemaque followed the basic principles of writing production i.e., isochrony principle and the two-thirds power law (see Introduction).

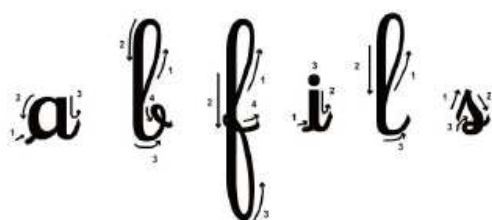


Fig. 3. The typography of each letter produced by Telemaque. The numbers inscribed above the arrows indicates the order of the production in the dynamic tracing of letters exercise.

Ten trials were performed for each letter. As in the circuit game, the Movement time production of the letter was reduced during the session (Table 2).

Table 2. Movement duration (in s) used in the Dynamic tracing of letters exercise according to the letter and the trials.

	Movement Duration (s)				Movement Duration (s)		
	Trial 1-4	Trial 5-7	Trial 8-10		Trial 1-4	Trial 5-7	Trial 8-10
<i>a</i>	5.7	4.2	3.2	<i>i</i>	5.2	3.9	2.9
<i>b</i>	6.4	4.8	3.6	<i>l</i>	4.2	3.1	2.3
<i>f</i>	11.6	8.7	6.5	<i>s</i>	3.0	2.2	1.6

2.2.2.2. The two specific exercises of the Control (C) intervention Regarding the C intervention, we proposed one exercise in which children wrote the target letters and one exercise involving a computer as in the VH intervention. In the first exercise children sat in groups of four around a table and were asked to copy the target letter ten times on a sheet of paper and to judge which one had the "best form". The second exercise was carried out individually as in the VH intervention. Children were comfortably seated in front of a laptop computer and they had to type on text software a sentence in which the target letter appeared frequently.

3. Results

For each parameter a three-way analysis of variance (ANOVA) was performed with repeated measures on the period (pre-and post-test) and the letters (*a*, *b*, *f*, *i*, *l* and *s*), and with an independent measures on the group (VH or C). For each analysis a significance level of 0.05 was chosen. As we hypothesised a benefit of the VH intervention on handwriting acquisition, we expected a significant interaction between the period and the group with a higher performance for the VH group in the post-test situation.

3.1. Average Velocity

Figure 4A shows the average velocity for each group according to the period. A significant interaction between the period and the group was observed, $F(1,40) = 13.96$, $p < 0.01$. In the pre-test session, the average velocity was 1.62 cm/s and 1.60 cm/s for the control and the Visuo-Haptic groups, respectively. In the post-test session the average velocity was 1.94 cm/s for the Control group and 3.23 cm/s for the Visuo-Haptic group. Furthermore this effect did not depend on the letter since no significant interaction between the group, the period and the letter was observed, $F(5,200) = 1.08$, $p = 0.37$.

3.2. Number of velocity peaks

Regarding the number of velocity peaks during the execution of letters, a significant interaction between the period and the group was observed, $F(1,40) = 6.63$, $p < 0.02$ (see Fig. 4B). In the post-test session the number of velocity peaks was indeed less important for the VH group (7.67) as compared to the C group (10.44). In the pre-test session, the average number of velocity peaks was 13.64 and 13.04 for the VH and The C group, respectively. Finally we can notice that the interaction between group, period and letter was not significant, $F(5,200) = 0.37$, $p = 0.86$. Therefore the interaction between period and group did not depend on the letter produced.

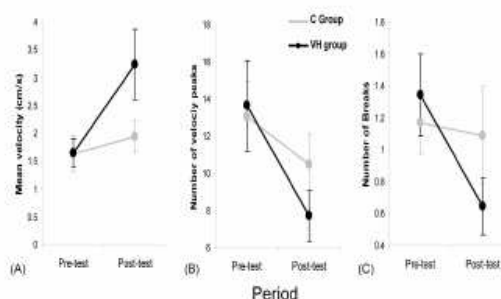


Fig.4. Results. Mean Velocity (A), Number of velocity peaks (B), Number of breaks (C) and 95% confidence intervals according to the period (pre-and post-test) and the group (VH or C).

3.3. Number of breaks

The number of breaks i.e., the number of time when children lifted the pen off the digital tablet are presented in Fig. 4C. A significant interaction between the period and the group was observed, $F(1,40) = 6.71$, $p < 0.02$. In the VH group, children made on average 1.34 pauses in the pre-test and 0.64 in the post-test. In the C group, the number of breaks was 1.16 and 1.08 in the pre- and the post-test session respectively. This effect seems did not depend on the letter since no significant interaction between the group, the period and the letter was observed, $F(5,200) = 0.91$, $p = 0.47$.

4. Discussion

The goal of the present study was to evaluate whether the use of a visuo-haptic interface (Telemaque) could improve the handwriting of cursive letters performances in kindergarten children (5 years-old). To test this hypothesis, we used a classical training on 6 target letters (*a, b, f, i, l, s*). The results indicated that the

fluency of handwriting production was improved after the VH intervention, for each letter. Indeed, after the training sessions the performances of the VH group were better than those of the control group: The average velocity improved after intervention, the movements exhibited less velocity peaks and children lifted the pen less often during the execution. Consequently, movements executed after a training involving Telemaque were more fluent. It is known that the differences between children with and without handwriting difficulties lay not only in the written products, but also in the dynamics of their handwriting performance [21, 22, 23, 24]. Therefore we can admit that the visuo-haptic intervention increases the handwriting production of cursive letters. Moreover, it is noteworthy that the results are the same whatever the difficulty of the letters. It would be interesting to verify whether this increase would be observed not only with the target letters but also with some letters not trained in the visuo-haptic intervention. Further studies were needed to examine this "cross-letter transfer" question.

At the beginning of handwriting, motor control is retroactive (based on sensorial feedback). Movements are slow and guided by visual and kinaesthetic feedback [1]. With practice, writing becomes automatic and the control of movement is mostly proactive (based on an internal representation of the motor act). Consequently, we may think that the use of Telemaque helps the motor system to incorporate the basic rules of motor production and therefore leads children to use proactive strategy to control handwriting movements. Indeed, as the Telemaque software is able to guide fingers via the pen both in spatial and dynamical movements, its aims at improving both the visual perception of the letter and the motor act which have to be produced for tracing a letter or a word.

However, in the present study, we asked participants to copy the cursive letters, a task that can be considered similar to drawing. We may wonder, therefore, whether the same results would be obtained in a spelling task i.e., a task when it is necessary to retrieve the letter stored in memory, to access the corresponding motor program, to set the parameters for the program and to execute the program. Finally, we think that this interface may be a solution in order to improve handwriting in dysgraphic children. More precisely, this remediation program should effectively act on problems of handwriting distortion, including incorrect letter forms, disconnected letters, wavy lines, lack of loops, touched-up letters, irregular letter shapes, and incorrect size proportions among letters.

Acknowledgments

This work was supported by the Centre National de la Recherche Scientifique, the Psychology and Neurocognition laboratory, the French Research Ministry's Cognitive program and France Telecom R&D. We should like to thank the schools and teachers, who participated to this study. We also should like to thanks Yvette Hatwell for its advice.

References

- [1] Zesiger, P. (1995). *Ecrire: Approche cognitive, neuropsychologique et développementale*. Paris: PUF.
- [2] Bara, F., Gentaz, E. & Colé, P. (2006). Comment apprendre à écrire ? In P. Dessus & E. Gentaz, (Eds), *Apprendre et enseigner à l'école* (pp. 5-25). Paris: Dunod.
- [3] Adi-Japha, E., & Freeman, N. F. (2001). Development of differentiation between writing and drawing systems. *Developmental Psychology*, 37, 101-114.
- [4] Brenneman, K., Massey, C., Machado, S. F., & Gelman, R. (1996). Young children's plans differ for writing and drawing. *Cognitive Development*, 11, 397-419.
- [5] Blöte, A. W., & Hamstra-Bletz, L. (1991). A longitudinal study on the structure of handwriting. *Perceptual and Motor Skills*, 72, 983-994.
- [6] Hamstra-Bletz, L., & Blöte, A. W. (1990). Development of handwriting in primary school: A longitudinal study. *Perceptual and Motor Skills*, 70, 759-770.
- [7] Bara, F., Gentaz, E. & Colé, P. (2004). The visuo-haptic and haptic exploration of letters increases the kindergarten-children's reading acquisition. *Cognitive Development*, 19, 433-449.
- [8] Berninger, V. W., Whitaker, D., Feng, Y., Swanson, H. L., & Abbott, R. D. (1996). Assessment of planning, translating and revising in juniors high writers. *Journal of School Psychology*, 34, 23-52.
- [9] Fayol, M., & Miret, A. (2005). Writing, spelling, and composing. *Psychologie Française*, 50, 391-402.
- [10] Gentaz, E., Colé, P. & Bara, F. (2003). Evaluation d'entraînements multisensoriels de préparation à la lecture chez les jeunes enfants de grande section maternelle. *L'Année Psychologique*, 104, 561-584.
- [11] Longcamp, M., Zerbato-Poudou, M. T., & Velay, J. L. (2005). The influence of writing practice on letter recognition in preschool children: A comparison between handwriting and typing. *Acta Psychologica*, 119, 67-69.
- [12] Kellogg, R.T. (2001). Long-term working memory in text production. *Memory and Cognition*, 29, 43-52.
- [13] Marr, D., Windsor, M., & Cermak, S. (2001). Handwriting readiness: locatives and visuomotor skill in the kindergarten years. *Early Childhood Research and Practice*, 34, 1-28.
- [14] Berninger, V. W., Graham, S., Vaughan, K. B., Abbott, R. D., Abbott, S. P., Woodruff Rogan, L. W., et al. (1997). Treatment of handwriting problems in beginning writers: Transfert from handwriting to composition. *Journal of Educational Research*, 89, 652-666.
- [15] Hays, D. (1982). Handwriting practice: The effect of perceptual prompts. *Journal of Educational Research*, 75, 169-172.
- [16] Karlsdottir, R. (1996). Development of cursive handwriting. *Perceptual and Motor Skills*, 82, 659-673.
- [17] Hennion, B., Gentaz, E., Gouagout, P. & Bara, F. (2005). Telemaque, a new visuo-haptic interface for remediation of dysgraphic children. *Proceedings of WorldHaptic*, 410-419.
- [18] Viviani, P. (1981). Les lois d'organisation motrice dans l'écriture. *Le Courrier du CNRS*, 39, 33-39.
- [19] Lacquaniti, F., Terzuolo, C., & Viviani, P. (1983). The law relating the kinematic and figural aspects of drawing movements. *Acta Psychologica*, 54, 115-130s.
- [20] Palluel-Germain, R., Bara, F., Hennion, B., Gouagout, P. & Gentaz, E. (2006). Early handwriting acquisition: Evaluation of Telemaque, a new visuo-haptic interface. *Proceedings of EuroHaptics*, 551-554.
- [21] Smits-Engelsman, B. C. M., Van Galen, G. P., & Portier, S. J. (1994) Psychomotor aspects of poor handwriting in children. In Simner, M. L., Hulstijn, W., & Girouard, P. L. (Eds.). *Contemporary issues in the forensic, developmental and neurological aspects of handwriting*. Monograph of the association of forensic document examination, 1.
- [22] Van Galen, G. P., Portier, S. J., Smits-Engelsman, B. C. M., & Shomaker, L. R. B. (1993). Neuromotor noise and poor handwriting in children. *Acta Psychologica*, 82, 161-178.
- [23] Wann, J. P. (1987). Trends in the refinement and optimization of fine-motor trajectories: Observations from an analysis of the handwriting of primary school children. *Journal of Motor Behavior*, 19, 13-37.
- [24] Wann, J. P. & Kardiramanathan, M. (1991). Variability in childrens handwriting computer diagnosis of writing difficulties. In Wann, J., Wing, A. M., & Sovik, N. (Eds.). *Development of Graphic Skills* (pp. 223-236). London: Academic Press.

H. Article 4 : Fredembach, Hillairet de Boisferon, & Gentaz (2009)

Fredembach, B., Hillairet de Boisferon, A., & Gentaz, E. (2009). Learning of arbitrary association between visual and auditory novel stimuli in adults: the “bond effect” of haptic exploration. *Plos One*, 4(3) :e4844.

Learning of Arbitrary Association between Visual and Auditory Novel Stimuli in Adults: The “Bond Effect” of Haptic Exploration

Benjamin Fredembach, Anne Hillairet de Boisferon, Edouard Gentaz*

CNRS and University of Grenoble 2, Grenoble, France

Abstract

Background: It is well-known that human beings are able to associate stimuli (novel or not) perceived in their environment. For example, this ability is used by children in reading acquisition when arbitrary associations between visual and auditory stimuli must be learned. The studies tend to consider it as an “implicit” process triggered by the learning of letter/sound correspondences. The study described in this paper examined whether the addition of the visuo-haptic exploration would help adults to learn more effectively the arbitrary association between visual and auditory novel stimuli.

Methodology/Principal Findings: Adults were asked to learn 15 new arbitrary associations between visual stimuli and their corresponding sounds using two learning methods which differed according to the perceptual modalities involved in the exploration of the visual stimuli. Adults used their visual modality in the “classic” learning method and both their visual and haptic modalities in the “multisensory” learning one. After both learning methods, participants showed a similar above-chance ability to recognize the visual and auditory stimuli and the audio-visual associations. However, the ability to recognize the visual-auditory associations was better after the multisensory method than after the classic one.

Conclusion/Significance: This study revealed that adults learned more efficiently the arbitrary association between visual and auditory novel stimuli when the visual stimuli were explored with both vision and touch. The results are discussed from the perspective of how they relate to the functional differences of the manual haptic modality and the hypothesis of a “haptic bond” between visual and auditory stimuli.

Citation: Fredembach B, de Boisferon AH, Gentaz E (2009) Learning of Arbitrary Association between Visual and Auditory Novel Stimuli in Adults: The “Bond Effect” of Haptic Exploration. PLoS ONE 4(3): e4844. doi:10.1371/journal.pone.0004844

Editor: Justin Harris, University of Sydney, Australia

Received: September 16, 2008; **Accepted:** January 9, 2009; **Published:** March 16, 2009

Copyright: © 2009 Fredembach et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Funding: The research was supported by CNRS grants and University of Grenoble 2. The funders had no role in study design, data collection and analysis, decision to publish, or preparation of the manuscript.

Competing Interests: The authors have declared that no competing interests exist.

* E-mail: Edouard.Gentaz@upmf-grenoble.fr

Introduction

It is well-known that human beings are able to associate stimuli (novel or not) perceived in their environment [1–5]. For example, this ability is used by children in reading acquisition when arbitrary associations between visual and auditory stimuli must be learned. Indeed, it is generally agreed upon that reading acquisition consists of two parts: on the one hand, the development of phonological and orthographic representations and, on the other hand, the establishment of associations between these two types of representation [6–7]. There is little research devoted to the way in which these associations come about and what there is tends to consider it as an “implicit” process triggered by the learning of letter/sound correspondences. Reading training intervention adheres to this conception [8–9]. However, although this type of intervention has a positive effect on reading, its acquisition generally remains slow and difficult. This means several months of formal instruction are necessary before young children grasp the logic of the alphabetic principle and use it [10–12].

In light of Bryant and Bradley’s work (1985) [13], we assume that one of the difficulties involved in learning how to read relies partly on the establishment of associations between the ortho-

graphic representation of a word and the corresponding phonological representation, i.e., between the visual image of the word and its auditory image. In an attempt to overcome this difficulty, a “multisensory” learning method not relying only on the visual and auditory modalities as is traditionally the case, but also on the manual haptic modality, can be used. Indeed, our hands do not simply possess the motor function of moving or transforming the objects in our environment, but also have a highly efficient active perceptual function [14–17].

Several studies revealed the positive effects of the visuo-haptic exploration of letters in relief when learning how to read, i.e., learning how to arbitrarily associate visual and auditory stimuli. In these studies, Gentaz and his colleagues [18–21] evaluated the effects of two methods intended to help very young children in the understanding of the alphabetic principle. Both interventions proposed several exercises concerning the knowledge of letters (graphemes), the identification of sounds (phonemes) and the letter-sound correspondences. One letter/sound association was studied in each session. The two interventions differed according to the perceptual modalities used to explore the target letters: with the visual modality only in the classic (control) intervention and with both the visual and haptic modalities in the multisensory

(experimental) intervention. The letter knowledge, phoneme identification and the decoding of pseudo-words were evaluated before and after the interventions. Among children with a standard level of letter knowledge, results revealed that the performance in the decoding of pseudo-words increased after both interventions but were significantly higher after the multisensory intervention. It should be noted that the knowledge of letters and the identification of phonemes increased similarly after both interventions.

These studies showed that the incorporation of the visuo-haptic exploration of relief letters during a training session, focused on the alphabetic principle, increased its positive effects on decoding skills in kindergarten children. Two complementary hypotheses were proposed to explain these positive effects [18–19]. The first hypothesis was based on the addition of the motor information associated inherently with the cutaneous and kinesthetic information generated during the visuo-haptic exploration of visual letters. This multiple coding of the letter may increase the memorization of each letter's shape [22–23], (for neural bases [24–25]) and would enable a faster activation of the multisensory representation of the letters. As a result, letter identification and then reading ability could be facilitated. The second hypothesis was based on the functional differences of the sensorial modalities involved in interventions [14,19]. Indeed, vision is characterized by its quasi-simultaneity and is therefore more suitable for processing and representing spatial stimuli such as letters. On the other hand, listening is sequential in nature and is more suitable for processing temporal stimuli such as the sounds of speech. This functional difference could explain why young children have some difficulties in establishing the association between letters, which are processed visually, and sounds, which are processed auditorily. In contrast, the haptic modality shares characteristics with both the auditory and the visual modalities. Even though its functioning is highly sequential in nature, haptic perception is also spatial perception since the exploration in this modality is not linear and subject to a fixed order. The sequential exploration generated by the incorporation of the haptic modality would lead children to process the letters in a more analytical way than when the letters were visually presented. Taken together, the visuo-haptic exploration would help to build a link between the visual processing of the letter and the auditory processing of the corresponding sound; a "haptic bond effect".

The aim of the present study was to examine whether the addition of the visuo-haptic exploration would lead to more efficient learning of arbitrary associations between visual and auditory novel stimuli in adults as well. This question was not trivial because the characteristics of the visuo-haptic exploration of adults are different from those of young children. First, the study of analytical processes and the integration of different object properties into a unified whole with Garner's (1974) [26] classification research paradigms have provided of some differences in the haptic modality in children and adults, mainly due to the nature of haptic exploration [27–29]. Because of partial and poorly organized exploratory procedures, young children proceed to inspect certain properties sequentially, and their classifications are thus based on the dimension they perceived well.

That is why, in free classification tasks, changes due to age seem to operate in the opposite direction to what is usually observed in vision, since the young preferentially make dimensional classifications and not classifications by overall similarity. But adults have reversed results: they classify more by overall similarity than by dimension in haptics, contrary to what is done in vision [30–32], because they give priority to the ultimate step of perceptive processing which, in haptics, is the reconstruction of the total

object from its elements. Second, a visual dominance is often observed in adults: the bimodal exploration (simultaneous visual and haptic exploration) of spatial properties of shape is not more efficient (when the test is visual) than unimodal visual shape exploration. This visual dominance is not systematically observed in young children [33–35].

To examine whether these characteristics of the haptic exploration of adults would influence the positive effect of the addition of this modality, adults were asked to learn 15 new associations between novel visual stimuli and their corresponding sounds in two learning methods which differed according to the perceptual modalities involved in processing the stimuli. Adults used either their visual modality in the "classic" learning method or their visual and haptic modalities in the "multisensory" learning method. The performance in two intramodal (visual and auditory) recognition tests and two intermodal (visuo-auditory and auditory-visual) recognition tests were evaluated immediately after each intervention and one week after. In intramodal tests, adults were asked to find which visual (or auditory) stimulus was previously learned among five alternatives. In intermodal tests, a visual (or auditory) stimulus was presented to the participant who was asked to find its matching sound (or visual) stimulus among 5 alternatives. If the addition of the visuo-haptic exploration is efficient in adults as well and thus helps them to learn more effectively the arbitrary association between visual and auditory novel stimuli, performance in the intermodal recognition tests would reveal this positive effect. The ability to recognize the associations would be above the chance level after both interventions but higher after the multisensory method than after the classic one. If this positive effect is indirectly due to better memorization of visual stimuli (as we hypothesized in previous studies), participants would show a better ability to recognize the visual stimuli after the multisensory method than after the classic one. In all cases, participants would show a similar above-chance ability to recognize the auditory stimuli after both methods. Furthermore, we expect that with a delay between the learning phase and recognition tests, performance will remain stable after the multisensory training method and decrease for the classic one, according to time-dependant consolidation found in some motor memory tasks [36] and the standard forgetting curve in the visual memory.

Results

1 Intramodal recognition tests

Firstly, we examined independently the efficiency of learning of the visual stimuli and auditory stimuli for both groups. Student tests were used to compare the results of each group immediately after the learning phase to "chance level" ($= 1/5$ per item = an overall score of 3/15). For the visual stimuli, results showed that performance was significantly different from this chance level in the multisensory ($M = 7.3$ and $SD = 1.9$; $t(14) = 8.5$, $p < .05$) and classic ($M = 8$ and $SD = 2.9$; $t(14) = 6.6$, $p < .05$) groups. This means that learning of the visual stimuli had occurred in both groups. Regarding the auditory stimuli, the results showed that the performance in the immediate recognition test was significantly above the chance level in the multisensory ($M = 8.87$ and $SD = 1.13$; $t(14) = 20.2$, $p < .05$) and classic ($M = 8.13$ and $SD = 2.7$; $t(14) = 7.38$, $p < .05$) learning methods. This means that learning of the auditory stimuli had occurred for both groups too (Figure S1).

1.1. Visual test. An analysis of variance (ANOVA) was performed on the mean number of visual stimuli correctly recognized, with delay (immediate and delayed recognition) as within-subjects factor and learning methods (multisensory or classic) as between-subjects factor (Figure S1). This analysis did not

reveal a main effect of training method [$F(1,28)=0.76$; $p=.39$]. The delay increased performance [$F(1,28)=4.46$; $p<.05$; with $R^2=0.14$], with better performance in delayed recognition ($M=8.7$; $SD=2.4$) than in immediate recognition ($M=7.6$; $SD=2$). The interaction between learning method and delay was not significant [$F(1,28)=0.1$; $p=.75$].

1.2. Auditory test. An analysis of variance (ANOVA) was performed on the mean number of auditory stimuli correctly recognized, with delay (immediate and delayed recognition) as within-subjects factor and learning methods (multisensory or classic) as between-subjects factor (Figure S1). This analysis did not reveal a main effect of training method [$F(1,28)=0.03$; $p=.86$], delay [$F(1,28)=1$; $p=.33$] nor learning method \times delay interaction [$F(1,28)=1.64$; $p=.21$].

2. Intermodal recognition tests

First, we examined the efficiency of learning of associations between visual and auditory stimuli for both groups. Student tests were used to compare the results of each group immediately after the learning phase to "chance level". In the visual-auditory test, results showed that the immediate performance was significantly above chance level in the multisensory ($M=9.20$ and $SD=1.26$; $t(14)=18.98$, $p<.05$) and classic ($M=6.67$ and $SD=2.9$; $t(14)=6.06$, $p<.05$) groups. In the same way, results in the auditory-visual test showed that the immediate performance was significantly above chance level in multisensory ($M=6.4$ and $SD=1.80$; $t(14)=7.30$, $p<.05$) and classical ($M=5.7$ and $SD=2.5$; $t(14)=4.14$, $p<.05$) learning methods (Figure S2). This means that learning of the arbitrary associations had occurred in both groups whatever the direction of association (from vision to audition or from audition to vision).

Secondly, an analysis of variance (ANOVA) was performed on the mean number of associations between visual and auditory stimuli correctly recognized, with the direction of association (visuo-auditory and audio-visual) and delay (immediate and delayed recognition) as within-subjects factors and, learning methods (multisensory or classic) as between-subjects factor (Figure S2). This analysis revealed a main effect of training method [$F(1,28)=8.66$; $p<.005$, with $R^2=.24$]. Indeed, performance was significantly higher after the multisensory learning ($M=7.12$ and $SD=2.17$) than after the classic one ($M=5.57$ and $SD=2.27$). The delay decreased performance [$F(1,28)=14.58$; $p<.001$; with $R^2=.34$], with a higher mean number of correct recognitions immediately after the learning ($M=6.88$ and $SD=2.34$) than one week later ($M=5.8$ and $SD=2.23$). There was also a main effect of the direction of association [$F(1,28)=26.38$; $p<.0001$; with $R^2=.49$]: Participants performed better in the visuo-auditory recognition test ($M=7.22$ and $SD=2.18$) than in the audio-visual recognition test ($M=5.47$ and $SD=2.19$).

The interaction between the method and the direction of association was significant also [$F(1,28)=4.85$; $p<.05$]. The Newman-Keuls comparisons (with a 0.01 alpha level) revealed that participants after the multisensory learning method recognized more associations in the visuo-auditory recognition test ($M=8.37$ and $SD=1.47$) than in the audio-visual test ($M=5.87$ and $SD=2.03$). By contrast, after the classic learning method, the performance observed in the visuo-auditory ($M=6.07$ and $SD=2.16$) and audio-visual tests ($M=5.07$ and $SD=2.26$) did not differ significantly. Furthermore, performance in the visuo-auditory test was significantly better after the multisensory learning than after the classic one whereas performance was equivalent for the two groups in the audio-visual test (Figure S3). Interactions between learning method and delay [$F(1,28)=0.1$; $p=.33$] and delay and direction of association [$F(1,28)=0.05$; $p=.83$] were

not significant. Neither was interaction between learning method, delay and stimulus type [$F(1,28)=2.42$; $p=.13$].

Discussion

This study examined whether the addition of the haptic modality would lead adults to more efficient learning of arbitrary association between visual and auditory novel stimuli. In addition, we hypothesized that this enhancement could be due to a better memorization of shapes. To test these hypotheses, adults were asked to learn 15 associations between novel visual stimuli and their corresponding sounds with two learning methods which differed according to the perceptual modalities involved to process the visual stimuli. The participants used their visual modality in the "classic" method and their visual and haptic modalities in the "multisensory" method.

The first result was that the performance in the visuo-auditory recognition test was above chance after both methods but was better after the multisensory learning method than after the classic one. The addition of haptic exploration of visual novel stimuli seems to help adults to associate more shapes and sounds than does visual exploration only. This result was consistent with the results observed in ordinary children, as reported in the introduction. But, contrary to our hypotheses, the performance in the audio-visual recognition test (i.e., the reverse direction) was similar after using both learning methods. Furthermore, an asymmetry appeared in the intermodal recognition tests for the multisensory group. Indeed, participants recognized more associations in the visuo-auditory recognition test than in the audio-visual one. It should be noted that asymmetries were often observed in crossmodal tasks like between vision and touch in infants, children and adults ([37–39]) and their explanations are still in debate (for a review [15]).

According to Ernst and Bulthoff [40], one determinant of where crossmodal convergence of object information occurs is which modality provides the most accurate information about objects. Usually, humans obtain most of their information about objects from vision for which shape is the most salient attribute. In our research, because we used arbitrarily related multimodal information (shapes and sounds), both visual and auditory modalities involved in learning delivered different relevant information (spatial and temporal). Thus, the crossmodal memory could be maximized ("sensory combination") and participants were able to recognize clearly shapes from sounds and vice versa. On the other hand, when we added the haptic modality in the training phase, it is possible that redundant signals about spatial information on the visual stimuli, provided by both visual and haptic modalities, increased the percept reliability ("sensory integration"). First, it could explain why the multisensory group obtained better performance than the classic one. Secondly, because of competition from more salient modality-specific information (spatial vs. temporal), it could generate an asymmetric crossmodal performance.

The second set of important results showed an equivalent mean number of visual stimuli recognized by participants after both training methods. The haptic effect observed in the intermodal task cannot be simply explained by a better memorization of the visual stimuli. However, Pascual-Leone and Hamilton assume that relevant inputs from senses are exploited to execute particular processing tasks successfully [41]. It could be speculated, because of the nature of the task (to recognize learned shape among unlearned ones), that the visual modality alone is recruited and provides enough reliable spatial information to perform the task as accurately in both learning groups. We could also hypothesize that the shape percept is improved by additional information collected

via the haptic exploration, which may improve recognition speed. Then, the intramodal recognition test used in the present experiment constituted too global a measure of the shape knowledge because it did not take into account the speed of shape recognition.

Finally, we noticed a slight improvement of performance in the visual intramodal recognition test after a week of delay. This result was not expected because we believed that performance remained stable in the multisensory training and decreased in the classic one because of the potential effect of the haptic exploration on the memorization of shapes. This result is probably a false positive because, on the delayed recognition test, the participants of both groups benefited further from having seen the trained shape a second time during the immediate intermodal recognition test.

In conclusion, the present study underlined the positive effects of the addition of visuo-haptic exploration in learning of arbitrary associations between novel visual and auditory stimuli in adults (for review about haptics in education [42]). Although the mechanisms of its action are still in debate, haptic exploration seems to play a role in “bonding” between visual and auditory stimuli in young children as well as in adults, whether or not the characteristics of visuo-haptic exploration of adults are different from those of young children.

Methods

1. Participants

Thirty monolingual French adult students took part in this experiment (Table 1). The participants in the two learning methods were matched on each of the following criteria: age and Raven test (t test: $p > .25$). There were 15 adults in each group. The present study was conducted in accordance with the Declaration of Helsinki. It was conducted with the understanding and the written consent of each participant which was obtained and was approved by the local ethic committee of the LPNC (CNRS and University of Grenoble 2).

2. Stimuli

2.1. Visual/haptic stimuli. The visual and haptic stimuli were signs derived from the Japanese katakana alphabet. All thirty five stimuli were created using graphical software. Fifteen of these were selected at random as visual and haptic stimuli (Figure S4) to learn and others (Figure S5) were used as visual distractors. The visual stimuli were printed on paper cards for the classic group and the haptic stimuli were cut into foam and then glued on paper cards for the multisensory group. The haptic stimuli were not used in the classic learning group to avoid spontaneously manual explorations which were forbidden in this condition. The visual and haptic stimuli used in learning sessions were the same for the two groups (average dimensions were about $7.5 \times 11.5 \times 0.5$ cm).

2.2. Auditory stimulus. Thirty five sound stimuli were created with software that generates a computerized voice (Microsoft Sam). These sound stimuli were constituted of sequences of two or three letters/sounds co-articulated so,

undistinguishable individually. The combinations of these computerized sounds were chosen to be without meaning. The duration of each sound stimulus was on average of 500 ms. These sound stimuli were then converted to the Mp3 format and played using the Winamp player. Fifteen were selected at random as stimuli to be learned and others used as distractors in the auditory recognition test (each visual distractor was presented twice). These sound stimuli were presented to the participants through headphones (Sony MDR-V150).

2.3. Association between visual/haptic and auditory stimuli. The association between the 15 visual and auditory stimuli was randomly determined. Once the associations were created, they remained the same across participants. The presentation order of these associations was randomized across participants of both groups.

3. Procedure and experimental conditions

Two groups, each composed of 15 participants, were constituted. Each group was assigned to a specific method: a classic (visual-auditory) learning method or a multisensory (visual-auditory-haptic) learning method. Each learning method was presented to each participant in a single session. After this learning phase, each participant performed the same four recognition tests immediately after intervention and one week later.

3.1. The two learning methods. In the visual-haptic-auditory group (multisensory method), each participant had to learn the 15 associations (the visual stimuli and their corresponding sounds) by using both the visual, haptic and auditory modalities. For each association, the participants explored the visual stimulus using their eyes and hands and simultaneously heard the corresponding sound. It should be noted that the visuo-haptic exploration of haptic stimulus was obligatory and unguided. Because the duration of visual and haptic exploration was about 10 seconds, and in order to equal the time of presentation of both the visual-haptic and auditory stimuli, the sound was repeated three times with a 3s inter-stimuli interval. This procedure was repeated for each of the 15 associations. In the visual-auditory group (classic method), the experimental procedure was the same as for the visual-haptic-auditory group, except that the participants used only their visual and auditory modalities to learn the associations.

3.2. The four recognition tests. After this learning phase, there were four recognition tests. Each participant performed two intramodal tests, in random order, followed by two intermodal tests, also in random order. Intramodal tests were stimulus recognition tests (visual and auditory) and intermodal tests, stimuli association recognition tests (visual-auditory and auditory-visual). Tests were given immediately after both methods (immediate recognition) and the other a week later (delayed recognition). No feedback was given.

In the visual intramodal recognition test, the participants had to find which visual stimulus was previously learned among five alternatives (1 target and 4 distractors). For each of the 15 learned visual stimuli, the participants were given an A4-sized sheet with

Table 1. Characteristics of participants in each training group.

Category	Classic group	Multisensory group
Age: M	20 years and 6 months (from 18 to 28 years)	20 years and 6 months (from 18 to 24 years)
Raven score: M (SD)	10.8 (5.7)	10.4 (3.9)

doi:10.1371/journal.pone.0004844.t001

five printed shapes. The participants were asked to “circle on the paper with a pen” the shape they recognized as being the target stimuli. The presentation order of the visual stimuli and the spatial position of the “learned” stimuli among distractors were randomized. In sum, there were 15 visual responses for each participant. In the auditory intramodal recognition test, the participants had to recall which one of five sounds (1 target and 4 distractors) was previously learned. The presentation order of the stimuli and the temporal position of the “learned” stimuli among the distractors were randomized. In sum, there were 15 auditory responses for each participant.

In the visuo-auditory intermodal recognition test, a visual stimulus was presented to the participant who was asked to find its matching sound among 5 alternatives (1 target and 4 other sounds). These four auditory stimuli were presented in the previous learning phase but were linked to different visual stimuli. In sum, there were 15 visuo-auditory responses for each participant. In the audio-visual intermodal recognition test, a sound was presented to the participant who then had to find its corresponding visual stimulus among 5 alternatives (1 target and 4 other visual stimuli). These four visual stimuli were presented in the learning phase but were linked to different auditory stimuli. In sum, there were 15 audio-visual responses for each participant. In total, there were 60 responses per participant.

It should be noted that the two intramodal recognition tests and the two intermodal recognition tests were different in nature: in the intramodal tests, the participants were asked to recognize one target (learned stimulus) among novel distractors (unlearned stimuli) whereas in the intermodal tests, they were asked to recognize one target (learned stimulus) among others learned (i.e., familiar) but not relevant stimuli.

Supporting Information

Figure S1 Mean number and standard error of visual and auditory stimuli correctly recognized (maximum 15) as function of

learning method and delay. The dotted line corresponds to the level of chance performance.

Found at: doi:10.1371/journal.pone.0004844.s001 (2.11 MB TIF)

Figure S2 Mean number and standard error of visuo-auditory and audio-visual associations correctly recognized (maximum 15) as function of learning method and delay. The dotted line corresponds to the level of chance performance.

Found at: doi:10.1371/journal.pone.0004844.s002 (2.10 MB TIF)

Figure S3 Mean number and standard error of visuo-auditory and audio-visual associations correctly recognized (maximum 15) as function of learning method.

Found at: doi:10.1371/journal.pone.0004844.s003 (2.11 MB TIF)

Figure S4 The 15 visual/haptic stimuli used in both learning methods.

Found at: doi:10.1371/journal.pone.0004844.s004 (0.07 MB TIF)

Figure S5 Eight examples of stimuli used as visual distractors in immediate and delayed intramodal recognition tests.

Found at: doi:10.1371/journal.pone.0004844.s005 (0.06 MB TIF)

Acknowledgments

We thank the adults who took part in the experiment, and Bernard Ans, Sébastien Caudron, Clément Fredembach, David Hope, Marie Lenormand, Sébastien Pacton, Pierre Perruchet and Carole Peyrin for comments on the manuscript.

Author Contributions

Conceived and designed the experiments: EG. Performed the experiments: BF EG. Analyzed the data: BF AHdB EG. Contributed reagents/materials/analysis tools: BF AHdB EG. Wrote the paper: BF AHdB EG.

References

- Aristote/Bazan B (1985) De Anima. Le commentaire de S. Thomas d'Aquin sur le traité de l'âme. Rev Sci Philos Theol 69: 521–547.
- Kandel E (2006) In search of memory. The Emergence of a New Science of Mind W. W. Norton & Company.
- Locke J (1689/1975) An essay concerning human understanding. Oxford: Oxford University Press.
- Pavlov IP (1927/2003) Conditioned reflexes. Courier Dover Publications.
- Thorndike EL (1898) Animal intelligence: an experimental study of the associative processes in animals. Paris: The Mcmillan company.
- Deheane S (2007) Les neurones de la lecture. Paris: Odile Jacob.
- Sprenger-Charolles L, Colé P, Serniclaes W (2006) Reading acquisition and developmental dyslexia. Hove: Psychology Press.
- Bus AG, Van Ijzendoorn MH (1999) Phonological awareness and early reading: A meta-analysis of experimental training studies. J Educ Psychol 91: 403–414.
- Byrne B, Fielding-Barnsley R (1991) Evaluation of a program to teach phonemic awareness to young children. J Educ Psychol 83: 451–455.
- Bara F, Gentaz E, Colé P (2004) Les effets des entraînements phonologiques et multisensoriels destinés à favoriser l'apprentissage de la lecture chez les jeunes enfants. Enfance 2–3: 145–167.
- Gentaz E (2009) La main, le cerveau et le toucher. Approche neurocognitive du sens haptique et des apprentissages. Paris: Dunod.
- Sprenger-Charolles L, Colé P (2003) Lecture et dyslexie. Paris: Dunod.
- Bryant P, Bradley L (1985) Children's reading problems: Psychology and education. New York: Blackwell.
- Hatwell Y, Streri A, Gentaz E, eds (2000) Toucher pour connaître. Psychologie cognitive de la perception tactile manuelle. Paris: P.U.F..
- Hatwell Y, Streri A, Gentaz E, eds (2003) Touching for knowing. Amsterdam: John Benjamins Publishing Company.
- Heller M, ed (2000) Touch, Representation and blindness. Oxford: Oxford University Press.
- Millar S (1994) Understanding and representing space. Theory and evidence from studies with blind and sighted children. Oxford: Clarendon Press.
- Bara F, Gentaz E, Colé P (2007) The visuo-haptic and haptic exploration increases the decoding level of children coming from low-socioeconomic status families. Br J Dev Psychol 25: 643–663.
- Bara F, Gentaz E, Colé P, Sprenger-Charolles L (2004) The visuo-haptic and haptic exploration of letters increases the kindergarten-children's reading acquisition. Cogn Dev 19: 433–449.
- Gentaz E, Colé P, Bara F (2003) Evaluation d'entraînements multisensoriels de préparation à la lecture pour les enfants de grande section de maternelle. L'Année Psychol 104: 561–584.
- Hillairet de Boisferon A, Bara F, Gentaz E, Colé P (2007) Préparation à la lecture des jeunes enfants: effets de l'exploration visuo-haptique des lettres et de la perception visuelle des mouvements d'écriture. L'Année Psychol 107: 1–28.
- Hulme C (1979) The interaction of visual and motor memory for graphic forms following tracing. Q J Exp Psychol 31: 249–261.
- Hulme C (1981) Reading retardation and multisensory teaching. London: Routledge & Kegan Paul.
- Chao LL, Martin A (2000) Representation of manipulable man-made objects in the dorsal stream. Neuroimage 12: 478–484.
- Longcamp M, Boucard C, Gilhodes JC, Anton JL, Roth M, Nazarian B, Velay JL (2008) Learning through hand- or typewriting influences visual recognition of new graphic shapes: Behavioral and functional imaging evidence. J Cogn Neuro 20: 802–815.
- Garner WR (1974) The processing of information and structure. Potomac, MD: Erlbaum.
- Berger C, Hatwell Y (1993) Dimensional and overall similarity classifications in haptics: A developmental study. Cogn Dev 8: 495–516.
- Berger C, Hatwell Y (1995) Development of analytic vs. global processing in haptics: The perceptual and decisional determinants of classification skills. Br J Dev Psychol 13: 143–162.
- Berger C, Hatwell Y (1996) Developmental trends in haptic and visual free classifications: Influence of stimulus structure and exploration on decisional processes. J Exp Child Psychol 63: 447–465.

30. Evans PM, Smith LB (1988) The development of identity as a privileged relation in classification: when very similar is not similar enough. *Cogn Dev* 3: 265–284.
31. Shepp BE, Swartz KB (1976) Selective attention and the processing of integral and nonintegral dimensions: a developmental study. *J Exp Child Psychol* 22: 73–85.
32. Smith LB (1989) A model of perceptual classification in children and adults. *Psychol Rev* 7: 811–824.
33. Hatwell Y (1994) Transferts intermodaux et intégration intermodale. In Richelle M, Requin J, Robert M, eds. *Traité de Psychologie Expérimentale*. Paris: P.U.F. pp 543–584.
34. Orliaguet JP (1983) Reproduction de position de bras chez l'enfant en situation intramodale visuelle et proprioceptive. *Cah Psychol Cogn* 3: 133–146.
35. Orliaguet JP (1985) Dominance visuelle ou proprioceptive lors de la perception de la position d'un bras chez l'enfant. *Cah Psychol Cogn* 5: 609–618.
36. Walker MP, Brakefield T, Hobson AJ, Stickgold R (2003) Dissociable stages of human motor memory consolidation and reconsolidation. *Nature* 425: 616–620.
37. Abravanel E (1973) Division of labor between eye and hand when perceiving shape. *Neuropsychology* 11: 207–21137.
38. Garvill J, Molander B (1973) Effects of standard modality, comparison modality and retention interval on matching of form. *Scand J Psychol* 14: 203–206.
39. Goodnow JJ (1971) Eye and hand: Differential memory and its effect on matching. *Neuropsychology* 42: 1187–1201.
40. Ernst M, Bulthoff H (2004) Merging the senses into a robust percept. *Trends Cogn Sci* 8: 162–169.
41. Pascual-Leone A, Hamilton R (2001) The metamodal organization of the brain. *Prog Brain Res* 134: 427–445.
42. Minogue J, Jones G (2006) Haptics in education: exploring an untapped sensory modality. *Rev Educ Res* 76: 317–348.

*I. Chapitre d'ouvrage : Hillairet de Boisferon, Bluteau, & Gentaz
(2010)*

Hillairet de Boisferon, A., Bluteau, J., & Gentaz, E. (2010). The assessment of spatial features and kinematics of characters: an analysis of subjective and objective measures, In M.Mori (Ed.), *Character recognition* (pp. 113-138). Sciyo.

The assessment of spatial features and kinematics of characters: an analysis of subjective and objective measures

Anne Hillairet de Boisferon, Jeremy Bluteau and Edouard Gentaz
*Laboratoire de Psychologie et NeuroCognition, Grenoble Université
France*

1. Introduction

Handwriting is a complex daily activity that involves attention, memory, linguistic, cognitive and perceptual-motor skills. As motor act, writing a letter requires to retrieve the letter storing in memory, to access the corresponding motor program (letter global shape, relative size of letter strokes), to set the parameters for the program (absolute size of letters and writing speed) and to execute the program (muscles recruitment) (Ellis, 1988; Van Galen, 1991). The letter to be traced and the corresponding graphic motion are intimately related in handwriting activity. Because both reading and writing are learned simultaneously in school, it may be assumed that letters are both coded visually and under a sensorimotor form (Hulme, 1981). From this point of view, the most notable example is probably Chinese or Japanese ideograms, which are composed of a number of strokes that must be written in a precise order when learning to read and write. The metaphor "grammar of action" was proposed by Goodnow & Levine (1973) to define stroke composition rules. Subsequently, this order is used as a cue to retrieve the ideograms from memory (Flores d'Arcais, 1994), suggesting that the motor schema specific to each ideogram may be an essential component of their representation. Many others arguments in favour of the tight coupling between the visual and sensorimotor representations of letter shapes can be advanced. First, Anderson et al., (1990) describe the case of a patient whose inability to write letters can be associated with deficits in the visual identification of letters. By contrast, she could easily read all numbers and nonverbal symbols, and she was equally able to write numbers and perform written calculations without difficulty. In a same way, writing movements can help alexic patients whose reading abilities are impaired. When they were asked to trace the outline of the letters with their fingers, they sometimes succeeded in recognizing letters they were not able to recognize only visually (Bartolomeo et al., 2002; Seki et al., 1995). To go further on, some researchers investigated the question of the presence of a global cerebral network including visual and sensorimotor components and mediating a multimodal representation of letters. Longcamp and colleagues (2003) showed activations of a part of the left premotor area during passive observation of isolated letters although no motor response was required. The same zone was also activated when the

participants were writing the letters. They suggested that handwriting motions might therefore be activated in memory by the visual presentation of letters. Moreover, this multicomponent neural network could be built up while learning concomitantly to read and write.

In this framework, handwriting acquisition consists in learning the visual representations of letters, which are used to guide their production, and the motor representations (motor programs) specific to each one. Longcamp, et al. (2005) have studied two groups of preschool children (aged 3–5 years) who were learning letters either by handwriting or by typing, and compared letter recognition performances one week later. Results showed that in the older children, handwriting training gave rise to a better letter recognition performance than typing training. Further research in multisensory-training protocols, as opposed to unisensory protocols, produce greater and more efficient learning. These results indicate that multisensory training promotes more effective learning of the information than unisensory training (Ernst & Bulthoff, 2004; Bluteau et al., 2008; Fredembach et al., 2009). The benefit of multisensory exposure is persistent even when information is gathered from unisensory condition (Shams & Seitz, 2008). These previous results suggest that character recognition abilities are somehow dependent on the way we learn to write and to read. To acquire proficient handwriting is required to produce legible texts to be read, and to a large extent, to communicate. Indeed, we write words manually to be read, character production is mainly guided by this implicit subjective recognition goal. However, handwriting acquisition is neither trivial nor effortless, and it takes many years of instructions to master this skill. Difficulties are also observed in adults involved in learning new handwriting systems. At the beginning of learning, movements are slow and guided by visual and kinaesthetic feedback resulting in letter forms not yet mastered. With practice, writing becomes more automatic and the control of movement is mostly proactive, that is to say, based on an internal representation of motor acts. The developmental changes in the product and the process of handwriting could be the consequence of a change from retroactive control of movement (based on sensorial, visual and kinaesthetic feedback) to proactive control (Zesiger, 1995; Bara & Gentaz, 2010; Hillairet et al., 2007).

Considering this whole framework, one can understand that handwriting recognition presents a challenge for most researchers working on letter perception. Indeed, how can people accurately discriminate letters given the important variability in handwritten forms? Classically it is assuming that to recognize handwritten letters people must be able to accept distortions on the standard letter. Freyd (1983) proposed an alternative to classical view, and demonstrates that handwriting recognition makes use of information about how the letters are formed. Specifically, perceivers could spontaneously infer the underlying dynamics pattern of motor movements used for a particular handwritten letter by applying their own knowledge of the production processes to its static trace.

To sum up, subjective handwriting recognition evaluation is accurate and relevant for character recognition analysis. A better understanding of the types of information (shape, kinematics, motor internal simulation) used by the perceiver could enhance the development of almost essential computerized character recognition methods. The finding that readers spontaneously extract production information from static handwritten characters may have implications beyond handwriting recognition. Essentially, in developing a handwriting recognition interface one should take into account static input as well as dynamic characteristics of handwriting. As we have seen, character production and

recognition both deal with static and dynamic features of letters, because spatial shape and kinematics of production are intimately related in handwriting activity. Finally, the question of "how quantifying handwriting and its static and dynamic characteristics?" despite a large extend of researches is not trivial and remains crucial. The choice and relation between subjective/objective, static/dynamic evaluation criteria is a decisive factor for character recognition.

2. Measure of writing performance

2.1 Historical approach

Over the years, many methods were developed for the evaluation of handwriting proficiency. Since academic instruction aims to write legibly and rapidly, quality and rapidity criteria seemed sufficient to evaluate handwriting. Thus, most of evaluations are based on analyzing the handwritten product and speed. Nevertheless, authors who work on handwriting acquisition run up against the problem of assessment. Since decades, researchers continuously tried to develop and improve standardized evaluations and proposed numerous tools, which can be classified according to whether they involve qualitative or quantitative measures, global or analytic scales, or measures of the handwriting product or process (for a review, see Rosenblum et al. 2003).

Historically, first evaluations were dedicated to an overall judgment of readability of written products. Handwriting production was first evaluated for its "global quality" or "legibility" before researchers developed more analytic evaluations based on predetermined criteria considered as important factors in written products quality. One of the first scales devoted to assess global quality of written product was the Thorndike Scale for Handwriting of Children (1910) (from fifth to eighth grade) based on the rating of "general merit". After handwriting was evaluated for its "general merit", authors proposed scales based on the attribution of an average score assigned by a group of judges who compared written texts to handwriting samples previously graded from "readable" to "unreadable".

In the aim to provide less subjective judgments, some authors proposed to replace global scales by using clearly defined criteria to grade handwriting samples. Analytic scales then gradually replaced the earlier global evaluations. With analytic scales, the various characteristics of handwriting considered as playing a role in the overall quality of written product are rated individually. The most common criteria used to judge writing legibility are letter form, size, slant, spacing, and line straightness. For example, Freeman (1959) scale included the following five criteria: tilt, height, shaping of letters, line quality and an overall score representing the general merit. These parameters still lead to recent development of character production analysis software (Guinet & Kandel, 2010). One of the more used analytic scales is The Concise Evaluation Scale for Children's Handwriting (Dutch abbreviation BHK; Hamstra-Bletz et al., 1987) first developed to examine the readability and speed of writing performance in young dysgraphic children. It should be noted that quantitative measures are sometimes preferred over qualitative ones because it is easier to quantify fluency (e.g., the number of characters a child is able to write in one minute or the total time taken by a child to complete a given text of a predefined number of characters) than legibility (scoring readability of handwriting products requires judges expertise and laborious comparison to numerous standards). For the BHK evaluation, children are asked to copy a standard text that is presented to them on a card for five minutes. The first five

sentences (grade 3 level of reading) are evaluated by judging deviations of the child's writing from the standard handwriting text according to 13 criteria (e.g. global size, line straightness, spacing, letters joins, letters distortions, ambiguous shapes, overlaps between letters, wavering and trembling). A total score on all 13 criteria items is calculated to determine writing quality which is subsequently used to categorize the child as a poor or proficient writer). Copying speed is calculated according to the number of letters written in five minutes. The BHK diagnostic sensitivity, the development of norms and use among children in various populations explain the extensive use of the BHK in studies and clinical practice (Blöte & Hamstra-Bletz, 1991).

Although most researchers agree upon criteria used in analytic scales (Bruinsma & Nieuwenhuis, 1991), approaches used to collect handwriting products vary across studies and factors such as the nature of the handwriting task (e.g. copying or writing from memory tasks), given instructions (e.g. fast or slow handwriting) and graphic workspace (e.g. school writing paper or not) can influence written products quality. Moreover, scales are also designed in different aims, including handwriting difficulties assessment, detection of children being at risk to develop handwriting difficulties, developmental changes assessment, etc. Methodological variations hinder direct comparisons between analytic scales and limit the development of optimally effective handwriting assessment. Nevertheless, global and analytic scales permit an analysis of the handwriting final product. Considering the fact that handwriting is a highly dynamical process; it appears that evaluation of handwriting products do not provide many information about the underlying handwriting process. With the development of computerized measures, it is possible to assess the handwriting process while children are writing. Because handwriting movements require a precise organization in time and space, and proper control over pressure, spatial, and temporal measures during writing supply information about the degree of handwriting proficiency. In literature, we face an increasing number of measures dedicated to the analysis of specific aspects of the handwriting process (e.g. average velocity, production time, movement fluency) and dedicated to more static or global criteria (e.g. recognition rates, height, strokes number).

In conclusion, both approaches which assess the product or the process of handwriting have their advantages and inconveniences. Subjective evaluations (when someone has to judge the quality of the handwriting product) suffer from limited accuracy, sensitivity, and reliability, but are simple to implement and nearer to the natural situation of handwriting in the classroom. Moreover, in many cases, for example in presence of motor production noise in learning process or in handwriting troubles which deteriorated presentation conditions, experts still give their preference to subjective judgments of the quality even if human expert can also make mistakes. "In most applications, the machine performances are far from being acceptable, although potential users often forget that human subjects generally make reading mistakes" (Barrière & Plamadon, 1998). The more objective, computerized analyses make possible to evaluate handwriting dynamics by providing more accurate and more reliable data by means of rapid, automated procedures, but, the practical applications (clinical or educational issues) are still limited because the lack of global decisions about the legibility of a written product. In mainly cases of character recognition, subjective judgments remain more accurate than their computerized corresponding scores.

2.2 Human performance

The measure of performance in the execution of a task raises a number of issues, largely present in the literature under the term "motor learning and human performance" (Schmidt & Wrisberg, 2000). This measure depends on three main factors: the subject, the task and the environment.

First of all, the subject which is the fundamental element of any condition of motor performance comes with a number of characteristics: inherent abilities, cognitive-motor knowledge, sociocultural context and level of motivation. These characteristics can influence the way of carrying out the task and the performance. The estimation of these capabilities such as the level of subject expertise and the nature of the population to be tested may help up in the understanding of this influence. As an example, several normalized tests are applied to a limited population (child, in remedial persons, etc.).

The second factor in motor learning and human performance is the environment. It can affect the production of a task by the application of temporal constraints (limited time to complete a task), or spatial constraints. In the area of character recognition, the limitation by writing templates lines is an example of these environmental spatial constraints.

The last factor influencing the measure of performance is the task. The nature of the task directly affects the demand for performance and achievement. Certain tasks have high sensory demands, such as detection of an approaching ball to return to tennis. Others have high cognitive demands for action, planning and implementation of action. Finally, we can consider the competence necessary to execute the task, that is to say, the ability of the person to make the right move. In some tasks, only one of these factors will determine the performance of the person, but it is more often a succession of analysis, planning, decision and implementation of a gesture that is indicative of the degree of success or failure of the task. A first answer is to classify the task according to the progress of the task: discrete action, actions in series or ongoing activities. Discrete actions are generally fast and well defined from the beginning to the end. A pointing task belongs to this category. Actions in series are a succession of several discrete actions, connected in sequence and whose order is crucial in the successful accomplishment of the task. Some writing of characters (especially composed by several strokes like Chinese characters) obeys to this classification. Finally, the continuous actions are defined by the absence of precise start and end, and are generally repetitive. At a certain level of handwriting expertise, when subject has internalized and automated the motor act, handwriting can be classified as continuous action. Another classification of the tasks is to determine the sensorimotor load and cognitive load. For a beginner writer, drawing a character is mainly interfered with the control of its movements. Gestures are slow and guided by visual and kinaesthetic feedbacks. Children have to constantly check on their handwriting trace in order to guide their fingers in the right way. Then, with fluency, writing access the stage of cognitive treatments, by concatenating letters to make words, and then sentences with meaning. As an example, we can also cite the learning of Japanese or Chinese characters. At the end of the first elementary cycle, the students have to know a small set of 1006 kanji (denoted as *gakushuu kanji*) ordered by increasing level of difficulty. Finally, tasks can also be classified according to the degree of predictability of the environment. A task performed in a changing, unpredictable and open environment, requires an adaptation of the person. Writing a phone number while someone is driving on a bumpy road is a quite unpredictable environment. A closed task will be realized in a stationary environment and predictive. The person could then plan ahead the

completion of the task. That fact explains the needs of closed tasks for most of the normalized test or objective measure of character recognition to be effective. Gentile (Gentile, 1987) proposed a classification in two dimensions, depending on the predictability of the environment and the sensorimotor and cognitive load of the task. The change of type of task highly influences the intra individual performance of the task (Higgins & Spaeth, 1972; Franks et al., 1982), as illustrated in figure 1.

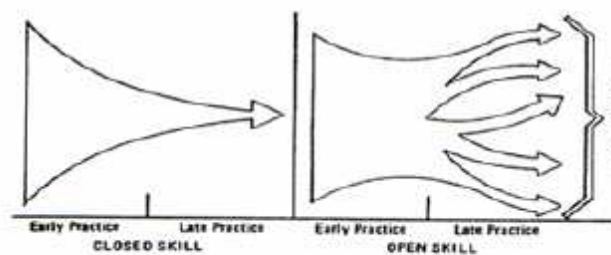


Fig. 1. Change of intra individual performance variability during closed or open skill environment. From Higgins and Spaeth (1972).

In this context, the question of which measure criteria should be used to evaluate motor performance remains. To clarify the multitude of possible measures, authors working in the field of human performance list three main types of measures (Guthrie, 1952):

- 1) the maximum certainty of achieving the goal;
- 2) the minimum energy expenditure, and
- 3) the minimum completion time.

Their variation is seen as a variation of the degree of achievement of performance, from performance considered as beginner level to expert level (see figure 2). Performers who are more proficient in movements designed to achieve a particular goal usually demonstrate one or more of the qualities mentioned previously.

Reference	Early stage of learning	Later stage of learning
Fitts and Posner (1967)	Cognitive (trial and error), associative (honing in)	Autonomous (free and easy)
Adams (1971)	Verbal motor (more talk)	Motor (more action)
Gentile (1972)	Getting the idea of the movement	Fixation and diversification (closed or open skill)
Newell (1985)	Coordination (acquire the pattern)	Control (adapt the pattern as needed)
Associated Motor Performance Characteristics		
Early learning		Later learning
Stiff-looking	More relaxed	Automatic
Inaccurate	More accurate	Accurate
Inconsistent	More consistent	Consistent
Slow, halting	More fluid	Fluid
Timid	More confident	Confident
Indecisive	More decisive	Certain
Rigid	More adaptable	Adaptable
Inefficient	More efficient	Efficient
Many errors	Fewer errors	Performer recognizes errors

Fig. 2. Theoretical depictions of the stages of motor learning and associated motor performance characteristics. From Schimdt & Lee (1987).

The maximum certainty of goal achievement implies that a person is able to meet a performance goal regardless to the situation, on demand and without luck. This criterion can often be seen as a combination of low variability in task performance regarding to a predefined performance level. We can notice that variability in the required movements may help acquiring a maximum certainty of goal achievement as demonstrated in other motor learning fields such as sports (Barlett et al., 2007). The minimum energy expenditure is a consequence of a low noise action, realized without unwanted and unnecessary movements. Finally, the minimum completion time supposes that a skilled movement has a higher level if its duration is shorter than another movement, with the same level of precision. A contradiction remains with the certainty of goal achievement criterions while speed and accuracy are antinomic. Fortunately, humans seem to have the capability to swap speed for accuracy, depending on the task requirements.

The way to access to the three main types of measure of performance is founded on two types of information. The first class of information is directly accessed by internal states of sensorimotor system. Observations such as physiological parameters (ECG, EMG, etc.) or subjective evaluations about the performance belong to this group. These parameters are rich but often suffer from a complex analysis mainly due to the motor noise and complexity of the system. Furthermore, external states such as traces, on-line recording (cf. figure 3.a) or off-line recording (cf. figure 3.b) and observer evaluations can be seen as a second group of measurements. These former parameters suffer also from computation noise and/or subjectivity of observers, but are quite easier to analyse due to the recording of only a part of the system. In lots of performance evaluations, these criterions are preferred and proved their efficiency in constrained domains such as postal addresses (Cohen, 1991), bank check or census forms reading. In character recognition and performance measurement, both internal and external states information can be used simultaneously: for the writing task, EMG would be valuable for the estimation of minimum muscle energy expenditure and off-line record of several paper trails would be valuable for maximum certainty of achieving the goal. The two ways to access information have both complementary meanings. The special case of on-line recording allows access to the internal states of the system (pressure, forces, velocity, angles...) through the development of new sensors, and can be seen as belonging to both groups. For a detailed survey on off-line and on-line character recognition, see Plamadon (Plamadon, 2000).

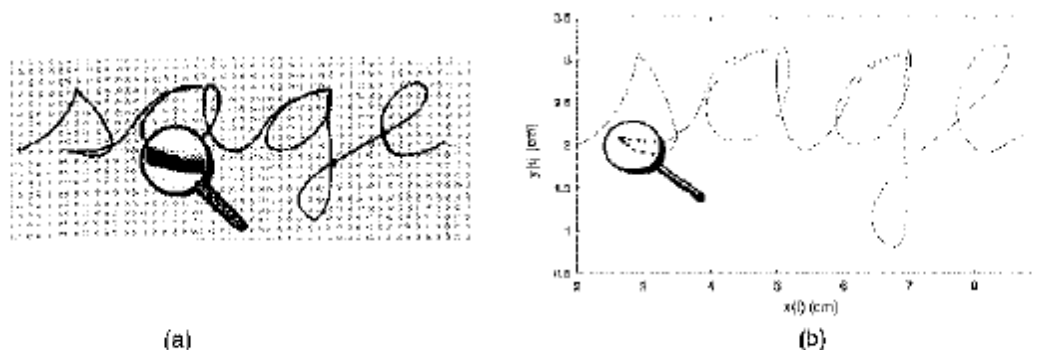


Fig. 3. a) Off-line word. The image of the word is converted into grey-level pixels using a scanner. b). On-line word. The x, y coordinated of the pen tip are recorded as a function of time by a digitizer (haptic device, tablet,...). From Plamadon, 2000.

3. Challenges: Which criteria do I have to choose for what?

Regarding human performance knowledge, a set of criteria chosen in the three main types (maximum certainty of achieving the goal; minimum energy expenditure, and minimum completion time) correctly depict the analysis of human performance. Nevertheless, the authors working on the acquisition of handwriting still face the problem of evaluation of character recognition. What class of criteria should we adopt in assessing the performance of manual gestures such as writing? Another way to classify character recognition performance criteria is based on the separation between objective and subjective measures. Subjective (qualitative) criteria result from a judgment, and objective (quantitative) criteria refer to a computerized numerical analysis. Creating tools to assess the quality of writing (i.e. character recognition) remains difficult despite the presence of many standardized assessments, and many measures that can be classified according to their consideration of qualitative or quantitative parameters. Historically, the production of writing was first evaluated on subjective criterions. Technological advances in computation and preference for objective scientific method has reversed the trend. However, the use of subjective criteria is still relevant for character recognition performance analysis and stay the final goal of character production. Indeed, we write words manually with the final objective to be read (i.e. give a trace to be visually evaluated). The character production is mainly guided by this implicit subjective recognition goal. In addition, two levels are accessible for such manual gesture and are offering to evaluate the performance: the writing process (gesture) and production (static trace) (Rosenblum et al., 2003). Each level includes different information respectively kinematics of gesture and static final quality of character. The fact that writing is a highly dynamic process with the support of strong relations between action and perception, allow us to study the process of production (gesture) to enrich the product evaluation (static trace). Technological advances made possible to study and quantify the links between spatial accuracy and kinematics of handwriting. But we face with a plethora of measures in the literature dedicated to the analysis of specific aspects of the writing process (average speed, production time, fluidity of movement...) and static global criteria based on the production (recognition rate, size of letters, number of strokes,...) with few links among them.

To clarify criteria choice for both gesture and handwriting products evaluation and quantification, we propose to identify the relation between static (product) and dynamic (handwriting process) measures in an objective and subjective evaluation of on-line acquisition of writing.

As suggested by several researches presented in §1, many connections between perception and action can be observed in humans. As the judgment of product and process involve human perception, correlation amongst static subjective criteria (mainly related to shape) and dynamic subjective criteria (related to kinematics) should appear (Hypothesis 1). Literature tends to distinguish in one hand static objective criteria related to shape and in the other hand, dynamic objective criteria, related to kinematics of production. Then, we should observe some strong links between static measures, and strong links between dynamics criteria. However, this hypothesis has to be contrasted in regards to existing tight coupling between spatial shape and kinematics in handwriting production. So, we also assume some correlation between static and dynamic objective measures (Hypothesis 2). The obvious example of mean velocity computation (distance divided by time) tends to suggest a relation between static objective measure (distance) and dynamic objective measure (time). At last, comparison between subjective judgments and objective measures

should be somehow related, justifying the current use of objective criteria instead of the classically performed subjective character recognition and evaluation. (Hypothesis 3)

4. Experimental evaluation of kinematics and spatial features: an analysis of subjective and objective measures

To access relations between spatial criteria and kinematics of handwriting and relations between subjective and objective judgments, we designed a two step experiment. The first phase consisted in the acquisition of children and adults handwriting. The second phase consisted in an evaluation of handwriting with an objective computation of criteria and subjective judgments.

4.1 Acquisition of handwriting

The acquisition phase differs in children and adults. By choosing two different populations, we wanted to access whether traditional handwriting evaluations could be generalized to pre-scriber children, who present more variable handwriting and are more susceptible to noise generated by the establishment of fine motor control. In addition, we wanted to generalize this evaluation with the learning of novel trajectories with adults. In traditional handwriting of cursive Latin characters, adults are considered as expert-scriber and a clear ceiling effect would have occurred on each evaluation criteria. Indeed, to avoid this effect, unknown trajectories were proposed to the participants. This choice is also related to the characteristics of subjects (developmental difference in sensory motor control) which have to be considered as proposed by human performance researches (cf. §2).

4.1.1 Participants

Forty-four children between the ages of 4.9 and 5.9 months (21 boys and 23 girls, mean age: 5.3) from two senior kindergarten classes in Grenoble participated in this study. All participants spoke French as their first language and no child had a statement of special educational needs. Permission for recruitment was gained from the head teacher of the school, and written informed consent for the participation of the children was obtained from their parents. At the same time, we asked 23 adults participants aged between 18 and 26 (including 13 girls, mean age: 21.3 ± 2.5) to participate in this study. All adult participants were unfamiliar with Arab or Japanese languages, and none of them had known motor trouble or neurological dysfunction. Their participation was done after their informed written consent, in respect with Helsinki declaration.

4.1.2 Method

The acquisition methodology differs in children and adults in order to take these two population specific needs.

On the one hand, children were seated comfortably in front of a table, upon which a digital tablet (Wacom®) was placed. In this measuring system, the positions of the pen were sampled at a frequency of 100 Hz and at a spatial resolution of .008 cm. The pen used in order to write on the tablet was a ball-point pen (Intuos Ink Pen, Wacom®) allowed to receive feedback of the written samples. A white paper was placed on the digital tablet. We asked children to copy on the paper the 26 cursive letters of the alphabet. Each letter was presented separately on a

paper placed in front of the child (for example see fig 4). There were no time and size constraints. The order of letter presentation was counterbalanced across participants. The test lasted approximately 10 min by participants. We randomly chose 250 trajectories over the 1144 collected for the incoming subjective judgments and objective analysis.

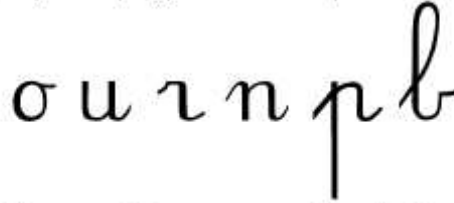


Fig. 4. Examples of standard cursive letters proposed to children participants

On the other hand, adult participants were asked to produce four foreign characters (Japanese inspired and Arabic letters - cf. figure 5). The choice of novel trajectories was a way of experimenting participants with a lower motor skill level, in order to avoid ceiling effect in both handwriting performance and character recognition. The digitalization of their traces was performed using a haptic device (PHANTOM Omni® from SensAble). The desired trajectory was displayed on a horizontal screen and the participant's pen trajectory was recorded from the haptic device, placed over the screen (Bluteau et al., 2008). Ergonomics efforts have been made to achieve this virtual co-located configuration, close to the real writing task, allowing standardize protocol of trajectories presentation and recording (Bluteau et al., 2008). As a result, we recorded at 1000 Hz the positions and forces applied during the drawing of characters. Each adult participants has to draw 20 trajectories, given in a pseudo random order (two consecutive and identical letters were not allowed). We kept only 250 of the 460 trajectories, randomly chosen for our analysis.

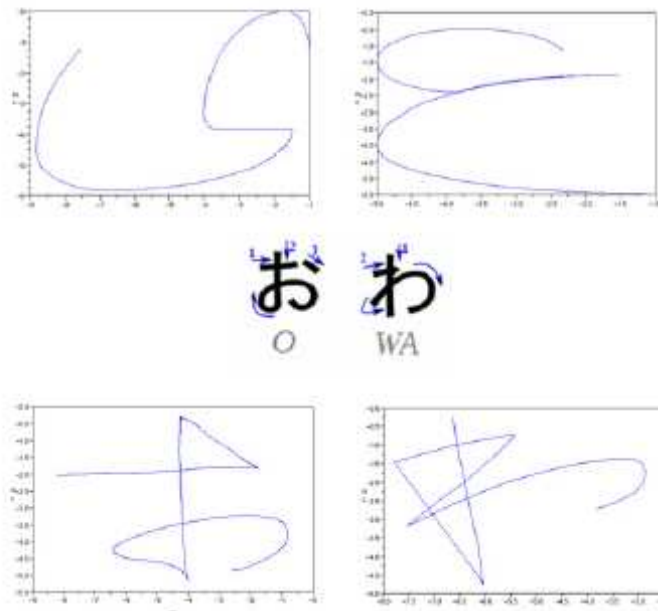


Fig. 5. Trajectories proposed to adult participants. The two upper letters were issued from Arabic alphabet. The two lower letters were issued from Japanese hiragana alphabet, with the order of drawing indicated above.

4.2 Evaluation of handwriting

In this second phase, subjective judgments and objective evaluations were performed. As we wanted to study the relationship between human evaluations and objective measures, the recordings from children and adults productions went through these two evaluations.

4.2.1 Subjective evaluation

Method

First of all, a "judgments" software (NoteSub) was developed to normalize the presentation of trajectories and gather the judgments. Two different display methods were proposed to get static (accuracy of the trace mainly based on spatial characteristics) and dynamic judgments (kinematics of the motor production) (cf. figure 6). The static display in which each of the shapes appear simultaneously on a computer screen was used to assess the quality of the product. The dynamic display, in which letters were printed on a computer screen, according to the cinematic of production of the writer, was used to evaluate the process of writing (kinematics). Two orders were given for either static presentation: "judge the graphical quality"; and dynamic presentation: "judge the quality of movements" of the presented letters. The letters were presented randomly in blocks of 50 letters for a static or dynamic judgment, in order to avoid a fatigue effect. The order of these blocks was balanced using a standard Latin square protocol. In total, judges rated two times each of the 250 letters (a static judgement and a dynamic judgement). Each judge had to recognize the character before evaluating the quality (rate from 1 - lowest quality, to 10 - highest quality) and were asked to describe the underlying criteria on which they based their judgment. In addition, a judgment was considered by the software as valid only when an "active" displacement of the rating cursor was performed (in order to avoid by default judgment). Finally, we obtained two subjective ratings for each trace: a score based on the product of handwriting, closely related to the shape or spatial criteria and a score of production process, closely linked to kinematics.

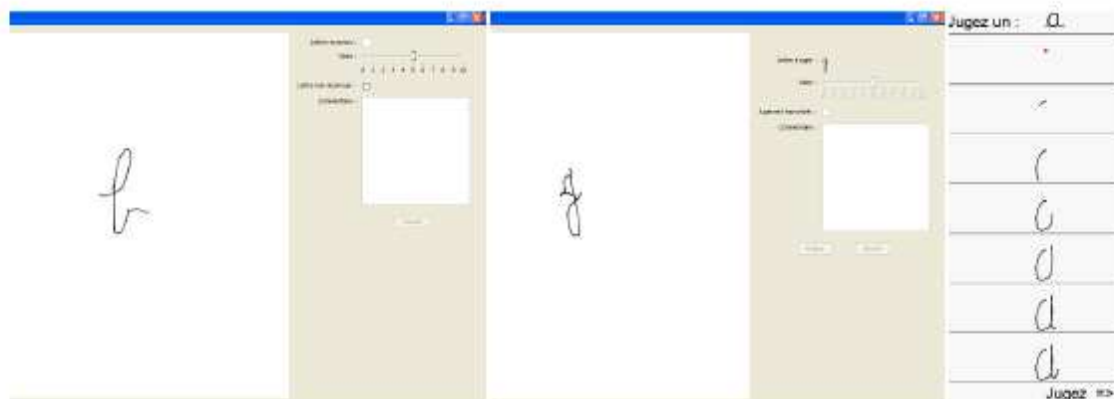


Fig. 6. Screen capture of NoteSub, the subjective evaluation software. (Left) Static Presentation of letters. (Center) Dynamic presentation of letters. (Right) Example of dynamic presentation, the letter appears gradually, in respect with subject movement velocity, pauses and pen lift up.

Participants/Judges

Ten judges evaluated the quality of character and writing process. Four of them were asked to judge the 250 children productions and six were asked to judge the 250 adult productions. Concerning adults production judgments, evaluators mean age was 32.6 years (± 9.6); concerning children production judgments, evaluators mean age was 28.2 years (± 2.8).

Subjective criteria

As previously describe, we asked judges to rate the "graphical quality" of the handwriting product (static trace) and the "movement quality" of the handwriting process (dynamic). In addition, for each set of letters, judges were asked to report underlying criteria of their judgments

a. Static presentation

Basing their assessment on a static presentation (called "static judgment" later in this chapter) judges had access to traditional presentation of character. Their character recognition performance and evaluation should include several spatial criteria such as tilt, orientation and shaping of letters encountered in literature. However, we can hypothesize that judges could also access to cinematic characteristics of the production given its subtle link to the written shape. For example, static clues such as curvature of letters could call to judge corresponding knowledge of rule production, the well known "two-third power law" (Viviani & Terzuolo, 1982) and allow access to cinematic parameters such as velocity. But we believe that their static judgment will be mainly based on spatial shape information.

b. Dynamic presentation

In the dynamic presentation, the judge had access to kinematics of production. This evaluation (called "dynamic judgment" later in this chapter) allows the extraction of cinematic parameters induced by pauses, accelerations and order of strokes. In order to avoid judgment based on shape's features, the character immediately disappears after dynamic presentation. We make the assumption that their dynamic judgment will be mainly based on kinematics of production. To our knowledge, this kind of kinematics judgments has not been implemented in literature but appears to be a substantial source of information.

4.2.2. Objective evaluation

Method

In parallels with subjective evaluation, the computation of objective measures was done using a normalized Matlab script. For each of the 250 adults and children trajectories, we calculated a number of objective measures, inspired by the literature. Quantitative spatial measurement considered were the number of strokes, the distance and a score of similarity between the "experimental trajectory" and "theoretical trajectory". This score (Dynamic Time Warping - DTW) provides access to a criterion of similarity of form. The quantitative cinematic measures considered include the duration of movement, duration of pauses, average speed and the number of velocity peaks. Their calculation was performed by a Matlab™ script, from the acquisition of positions at 1000 Hz for the adult production and 100 Hz for the children productions. In addition for further analysis, we computed predictors (or control variables) by taking in account the total distance of the track, standing for the difficulty of trajectories and the level of initial motor skills for children by a figure copy task. These various objective criteria are described in details below.

Objective criteria*a. Spatial shape**Number of Strokes and Number of pen up/pen down*

We defined a stroke as a continuous drawing of trajectory according to pen up/pen down actions. These measures are linked and are both indicators of the difficulty of the letter and the global formation of the shape of the letter. By counting the number of strokes, we are able to extrapolate the degree of fluency of writing for a specific letter. For example, in children above 7-years-old, the number of pen up/pen down (or number of strokes) is usually larger than the theoretical number of strokes required to trace the letter. This is due to absence of achieved motor program and efficient control of the trajectory (in charge of topokinesis and morphokinesis). Due to one-stroke design of adult trajectories, these criteria were only computed for children.

Distance of trajectories

We computed the total distance of the trajectories of our participants. Distance criterion could be considered as size information, one of the most common criteria used to judge writing legibility. This criterion is particularly used in children evaluation of written letters because size variations are important during handwriting acquisition. Young children's handwriting is often characterized by the production of large letters. When children better master fine movements required in writing, letters size decrease (Blöte & Hamstra-Bletz, 1991).

Dynamic Time Warping (DTW)

The computation of a distance score between two curves is a usual way of quantifying the differences or to put a figure on likeness. Classical distance measures include point-to-point distance quantification (also known as Euclidean distance), point-to-closest point or even unidimensional distance (known as Manhattan distance or nearest prototype). In 1983, Joseph Kruskal and Mark Liberman introduced a new technique to calculate the distance between two curves. This technique, called time warping, proposes to match the two curves by distorting time axis (or "warping" as called by its authors). This means that variation in writing speed is considered as noise and then will be deleted (or at least decreased) by the algorithm. This algorithm has been applied to many fields, including speech recognition, handwriting pattern recognition, video analysis, quality of cursive character in reference to a standard (Niels, 2004) and also sequence alignment. We will take this last example to detail the algorithm. In genetics, sequence alignment consists in transforming one sequence into another using edit operation that replaces, inserts or removes an element. Each operation has an associated cost, and the final alignment will be given by the lowest cost standing the sequence of editing operations. Note that the lengths of the two sequences do not have to be equal. The Dynamic Time Warping (DTW) belongs to dynamic programming methods, that solve complex problem by breaking it into simpler steps, and provides solutions to such genetic questions. The problem can be stated naturally as a recursion, a sequence *A* is optimally edited into a sequence *B* by either:

1. inserting the first character of *B*, and performing an optimal alignment of *A* and the tail of *B*
2. deleting the first character of *A*, and performing the optimal alignment of the tail of *A* and *B*
3. replacing the first character of *A* with the first character of *B*, and performing optimal alignments of the tails of *A* and *B*.

The same reasoning is valuable for comparison of distance between two sequences of points ($P1$ and $P2$), where step 1 stands for the computation of distance between $P1(i)$ and $P2(i+1)$, step 2 stands for the computation of distance between $P1(i+1)$ and $P2(i)$ and finally, step 3 stands for the distance computation between $P1(i)$ and $P2(i)$. The partial alignment of the two sequences (or curves) can be tabulated in a matrix, where $cell(n,m)$ contains the cost of the optimal alignment of $A[1..n]$ to $B[1..m]$ (or $P1(1..n)$ to $P2(1..m)$). The cost in $cell(i,j)$ can be calculated by adding the cost of the relevant operations to the cost of its neighbouring cells, and selecting the optimum. In other words, the global DTW cost is given by "finding the way of the valley of minimum cost into the cost matrix" (cf. Figure 7).

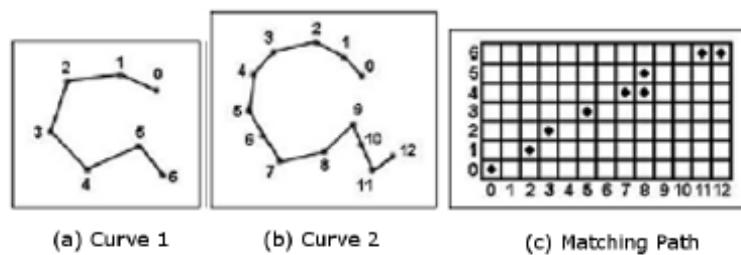


Fig. 7. Example of Matching path. (c) shows a possible matching path of the curves shown in (a) and in (b). Curve 1 is on the vertical axis and curve 2 is on the horizontal axis of the matching path. If we had filled the matching matrix with distances between points, this matching path would have been the visualisation of the way of the valley of minimum costs.

After the definition of the matching path, a backtracking algorithm allows visual checking of the alignment of the two sequences (cf. figure 8).

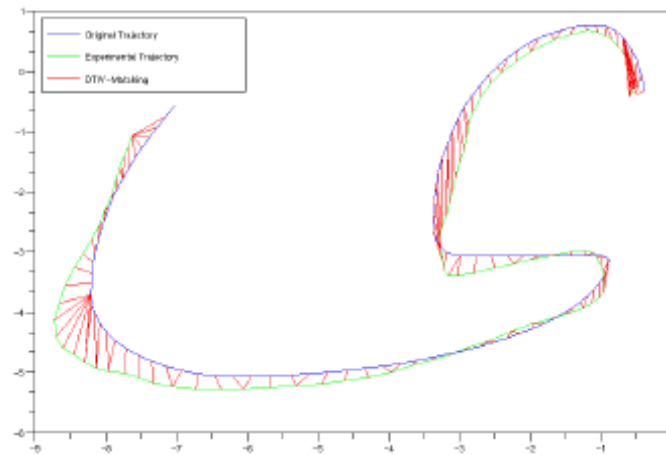


Fig. 8. Application of Dynamic Time Warping algorithm on a trajectory used in our experiment with adults and visualisation of the alignment using a backtracking algorithm. Optimal alignment (red) computed between theoretical trajectory (blue) and experimental trajectory (green) by a temporal distortion corresponding to a delay or advance between the two traces.

DTW allows comparison of sequences without re-sampling and has been demonstrated to be successful for comparison of discrete and online handwriting acquisitions (Niels, 2004;

Di Brina, 2008; Bluteau et al., 2008). This algorithm has a real application in character recognition as shown by this citation from Di Brina and colleagues (2008): "By objectively analyzing the spatial-temporal patterns, DTW captures the essential character of writing, i.e., the overall shape of its graphic output".

b. Cinematic criteria

Number of velocity peaks

This measure is classically seen as an indicator of writing fluidity and is related to the number of accelerations and decelerations during production. A movement is seen as jerky as soon as the number of velocity peaks is high. The number of velocity peaks is given by counting the number of zero crossing of the acceleration ($\partial v = 0$). The velocity profile has to be filtered to reduce acquisition noise. The filtering process implies different values in adults and children to access the number of velocity peaks. In our experiment, we used a third order Butterworth filter with a cut-off frequency of 12 Hz to filter the adult productions (down-sampled at 100Hz); and we used a third order Butterworth filter with a cut-off frequency of 6Hz to filter the children productions (sampled at 100Hz). We chose Butterworth filter for its large use in literature and its intrinsic parameters (slow roll offs around cut-off frequency and no ripples) compare to other quicker roll offs cutting filters (Chebishev filter, Elliptic filter, etc.).

Mean Velocity

This measure is also a traditional criterion to evaluate the fluidity of writing. Normalized tests have integrated it by counting the number of words or characters copied in a certain amount of time (i.e., fluency); Other researchers have used it to assess the level of expertise and writing performance with adults (Bluteau et al., 2008) or with children (Palluel-Germain et al., 2007). Many researchers claim that children's competence in writing depends, in part, on their mastery of handwriting. They found that handwriting skills, particularly handwriting fluency, improve with age and schooling (Graham et al., 1998; Hamstra-Bletz & Blöte, 1990) and these individual differences in handwriting fluency predict how much and how well children write (Graham et al., 1997). This measure enters in the minimum completion time class of human performance classification of criteria as soon as the required trajectory has a fixed length (distance).

Duration measures

Total duration of the trajectory

We computed the total duration to draw a character. This criterion gives an indication of the temporal performance on the path. It is linked to the average velocity and belongs to the same class (minimum completion time) of human performance classification.

Pen up duration

This criterion corresponds to the duration when the pen was up during the production of the character. An increase of this last measure indicates augmentation of breaks, and thus would reveals lacks in motor production of the character.

Number of pauses in character production

We defined a pause as a minimum of 150 ms period while the pen was down on the paper but no active movement was performed. This measure is an important indicator especially for children who often make pause while writing to visually check the model or their production in case of substantial breaks (i.e., allowing retroactive control based on visual and sensory motor feedbacks). This measure can also be an indicator of jerky handwriting in case of shorter breaks. This criterion is correlated with the level of expertise of the task.

Number of Strokes and Number of pen up/pen down

These criteria were already presented as shape specific criteria but they implicitly belong to dynamic criteria category. Indeed, the number of strokes of a writing production is intuitively correlated to cinematic criteria. A very high number of strokes reveal a quite bad cinematic of writing, thus referring to cinematic criteria. The same remark is valuable for the number of pen up/pen down criterion. This dual membership is also linked to the relation between action and perception. By the perception of some characteristics (such as the number of strokes), humans are able to deduce the actions performed to generate this product, and thus, to access the cinematic of production.

*c. Predictors or Control variables**Distance of trajectories*

This measure, previously classified as static, appears in the computation of the mean velocity and is implicitly linked to the difficulty of the trajectory. In a way, this criterion can be taken as a normalization index that could explain relations between kinematics and shape characteristics, especially in adults' productions.

Designs copying task (NEPSY)

We evaluate children motor and visuospatial skills using the designs copying subtest of the NEPSY – A Developmental Neuropsychological Assessment (Korkman et al., 1998). This subtest is an untimed two-dimensional constructional task that requires the integration of visuospatial analysis and graphomotor skills. Children have to reproduce paper-and-pencil copies of geometric designs of increasing complexity. These copies are then rated according to a set of indicators. Final normalized scores are comprised between 1 and 19. This measure does not count for character production evaluation but can be seen as a predictor variable of handwriting abilities.

4.3 Results**4.3.1 Preliminary analysis**

After the second step of subjective judgment, we retrieved a static and a dynamic score for each of 250 letters from children or adults, associated to the character actually recognized. We kept the recording if the required character matches the recognized one, and only if all judges recognized the letter. This work has to be done to avoid nonsense statistical means. This cleaning process leads to 204 trajectories for the children set and 221 trajectories for the adult set. We performed inter-judges correlation using reliability test (calculating Cronbach's alpha) that informed us about the homogeneity of scores through judges ($\alpha = .797$ for static judgments and $\alpha = .772$ for dynamic judgments of adults characters; $\alpha = .824$ for static judgments and $\alpha = .851$ for dynamic judgments of children characters). Regarding this preliminary analysis, we averaged static scores of judges for each character in a new variable, called *mean static* later in this chapter. The same operation was done for dynamic judgments in a new variable called *mean dynamic*.

4.3.2 Criteria's descriptive data

The Table 1 represents mean results and standard deviations obtained for each subjective and objective criteria collected for both children and adults handwriting products and process.

The assessment of spatial features and kinematics
of characters: an analysis of subjective and objective measures

17

Criteria	Children		Adults	
	Mean	SD	Mean	SD
Mean static	5.34	1.80	4.22	1.36
Mean dynamic	5.80	1.90	4.84	1.20
Total duration (s)	6.24	3.75	18.63	11.19
Pen up duration (s)	1.56	2.28	-	-
Mean velocity (cm/s)	1.84	1.02	1.37	0.66
Number of velocity peaks	12.14	7.53	5.44	2.49
Number of pauses	1.48	2.99	-	-
Number of strokes	1.96	1.45	-	-
Number of pen up	0.96	1.45	-	-
Distance (cm)	9.57	4.88	20.23	5.36
DTW	3.27	2.43	7.26	4.41
Designs copying	12.23	2.51	-	-

Table 1. Means and standard deviations (SD) of each static and dynamic criteria in children and adults.

Descriptive data reveal that despite mean distance, mean total duration and DTW score are more important and mean velocity is lower in adults trajectories, adults produced less acceleration and deceleration (i.e., number of velocity peaks) while they traced letters. These findings have to be related to the size of required trajectories in adults (cf. figure 5).

4.3.3 Correlation between static and dynamic subjective scores

We performed for each subjective judgment, correlations (Bravais-Pearson r) between static score and dynamic score attributed to children and adults handwriting products and process. Results showed a mean correlation coefficient of $r = .56$ (.55 to .60) in the judgment of children characters and a mean correlation coefficient of $r = .51$ (.35 to .61) in the judgment of adults characters.

4.3.4 Inter-correlation of static objective scores

We performed for each static objective measures inter-correlations (Bravais-Pearson r). Results are presented in table 2.

Criteria	Children			Adults	
	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)
(1) Distance (cm)	-	.42**	.17*	-	-.33**
(2) DTW	-	-	.27**	-	-
(3) Number of strokes	-	-	-	-	-

* $p < .05$ significance, ** $p < .01$ significance

Table 2. Correlations between objective static criteria in children and adults

Table 2 indicates mean levels of correlation between the three objective static criteria scores in children. The closest link is between distance measures and dynamic time warping (DTW) scores (.42). The relations between DTW and number of strokes scores and between distance and number of strokes scores (respectively .27 and .17) are weaker. All correlations

are significant and positive. The longer the trajectories are, the more the number of strokes is susceptible to increase, and the more the gap between the theoretical trajectory and the effective trajectory is susceptible to increase. In adults, as letters were always produced within one stroke, only two criteria were taken into account. The longer trajectories are, the smaller the gap between the theoretical trajectory and the effective trajectory tends to be.

4.3.5 Inter-correlation of dynamic objective scores

We performed for each dynamic objective measures inter-correlations (Bravais-Pearson r). Results are presented in table 3. This table indicates strong to weak levels of correlation between the six objective dynamic criteria scores in children and the three dynamic criteria scores in adults. Number of velocity peaks, total duration and mean velocity scores are correlated with most of objective criteria in children as well as in adults. Compare to previous criteria, pen up duration and number of pauses show less significant correlations with other objectives measures. Finally, number of pen up shows almost no correlation with other measures. More precisely in children, the closest links are between total duration and the number of velocity peaks (.89) and between number of pen up and the total duration (.77). Weaker correlations can be observed in this population between the number of velocity peaks and number of pauses (.50), the number of velocity peaks and mean velocity are negatively correlated (-.47) and finally low correlation appears between the number of velocity peaks and the pen up duration (.14). We can notice that mean velocity score is negatively correlated with the majority of dynamic criteria (total duration, pen up duration and number of pauses).

In adults, the closest links are found between total duration and the number of velocity peaks (.70), and between total duration and the mean velocity (-.71) which are negatively correlated. Moderate negative correlation also appears between the number of velocity peaks and the mean velocity (-.35).

Criteria	Children						Adults		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(1)	(2)	(3)
Number of									
(1) velocity peaks	-	-.47**	.89**	.14*	.50**	.08	-	-.35**	.70**
Mean velocity									
(2) (cm/s)	-	-	-.49**	-.002	-.33**	.08	-	-	-.71**
(3) Total Duration (s)	-	-	-	.09	.77**	.04	-	-	-
Pen up duration									
(4) (s)	-	-	-	-	-.02	.64**	-	-	-
Number of									
(5) pauses	-	-	-	-	-	.04	-	-	-
Number of pen									
(6) up	-	-	-	-	-	-	-	-	-

* $p < .05$ significance ** $p < .01$ significance

Table 3. Correlations between objective dynamic criteria in children and adults

4.3.6 Correlation between static and dynamic objective scores

We performed for each objective measures, correlations (Bravais-Pearson r) between static score and dynamic score attributed to children (table 4) and adults (table 5) handwriting products and process.

Static/Dynamic	Number of velocity peaks	Mean velocity (cm/s)	Total Duration (s)	Pen up duration (s)	Number of pauses	Number of pen up
Distance (cm)	.47**	.32**	.51**	.12	.28**	.17*
DTW	.29**	.003	.33**	.25**	.23**	.27**
Number of strokes	.08	.08	.04	.64**	.04	-

* $p < .05$ significance, ** $p < .01$ significance

Table 4. Correlations between static and dynamic criteria in children

In children, some moderate positive correlations can be observed amongst static and dynamic criteria. The closest link is observed between the number of strokes and the pen up duration (.64). It is interesting to note that the number of strokes is only correlated with this dynamic measure. Medium positive correlations are observed between distance and total duration (.51), between distance and the number of velocity peaks (.47). Weaker correlations implying distance are observed with mean velocity (.32), the number of pauses (.28) and the number of pen up (.17). We observed that the DTW (considered as a static indicator in literature) is correlated to most of dynamic scores (except mean velocity).

Should be noticed that despite inter-correlation between all static measure (table 2) and a majority of inter-correlation between dynamic measures (table 3), some correlation between static and objective measure seem important. For example, the number of pen up only correlated with the corresponding dynamic measure of pen up duration (.64) but correlated with two static criteria, the distance (.17) and the DTW (.27) scores

Static/Dynamic	Number of velocity peaks	Mean velocity (cm/s)	Total Duration (s)
Distance (cm)	.37**	.40**	.10
DTW	-.27**	.04	-.24**

* $p < .05$ significance, ** $p < .01$ significance

Table 5. Correlations between static and dynamic criteria in adults

Concerning adults characters analysis, we also observed strong correlations between static and dynamic scores. Medium and positive correlations are observed between distance and the number of velocity peaks (.37), and between distance and mean velocity (.40). The DTW measure is found to be negatively correlated with the number of velocity peaks (-.27) and with the total duration (-.24). These correlations remain moderates. As in children, some correlation between static and objective measure seem important but results also show that strongest links are found in adults between dynamic criteria (table 3), the total duration and the number of velocity peaks (.70) and the mean velocity along the path (-.71)

4.3.7 Correlation between objective and subjective evaluations in each population

To analyse the possible existing relation between subjective and objective evaluations, we performed forward stepwise regressions using subjective judgments as references. This analysis computes step by step linear regression, by including in each step predictor variable (objective criterion) with the highest shared amount of variance with the predicted variable (subjective criterion). At each stage in the process, after a new variable is added, a F-test (Fisher-Snedecor) is made to check if some variables can be deleted without appreciably increasing the residual sum of squares (RSS). The procedure terminates when the measure is maximized, or when the available improvement of the model falls below some critical value.

Regarding static criteria in children, the stepwise regression analysis reveals that number of strokes, distance and designs copying taken together explain 11% of the mean static judgment score [$F(2,200)=9.33; p=.034$]. Analysis of partial correlations indicates that number of strokes explain a unique amount of mean static judgment's variance [5%, $t(200)=-3.36, p<.001$], designs copying explain also a unique amount of variance [2.5%, $t(200)=2.24, p<.05$] and finally, distance criteria explains a unique amount of variance too at a level of 2.3% [$t(200)=-2.19, p<.05$]. On the dynamic criteria side, the analysis reveals that pen up duration, DTW and number of pauses taken together explain 38% of the mean dynamic judgment score [$F(3,200)=43.19, p<.01$]. Analysis of partial correlations indicates that the pen up duration explains a unique amount of mean dynamic judgment's variance [22%, $t(200)=-7.49, p<.001$], DTW explains a unique amount of variance [12%, $t(200)=-5.24, p<.001$] and finally, the number of pauses explain a unique amount of variance too [4.2%, $t(200)=-2.96, p<.01$].

Concerning static criteria in adults, the analysis reveals that DTW and mean velocity taken together explain 13% of the mean static judgment score [$F(2,218)=3.91, p<.05$]. Further partial correlations analysis reveals that the DTW [12%, $t(218)=-5.51, p<.001$] and mean velocity [1.8%, $t(218)=-1.98, p<.05$] both explain a unique amount of variance of the mean static judgment. The analysis of the dynamic judgment score in adults reveals that the number of velocity peaks, DTW, mean velocity and total duration taken together explain 16% of the mean dynamic judgment scores [$F(4,216)=4.14, p<.05$]. Partial correlations analysis reveal that the number of velocity peaks [3.9%, $t(216)=-2.97, p<.01$], the DTW [10.2%, $t(216)=-4.95, p<.001$], the mean velocity [4.5%, $t(216)=-3.18, p<.01$] and the total duration [1.9%, $t(216)=-2.03, p<.05$] explain each a unique amount of variance of the dynamic judgment score.

5. Discussion and Conclusion

This study was designed to identify the relationship between spatial features and kinematics of handwriting process through static and dynamic criteria in an objective and subjective evaluation of handwriting. The underlying purpose was to clarify and help criteria choice for both gesture and handwriting products evaluation and quantification.

First, statistical analysis of inter-correlation of subjective judgements puts forward the existence of a link between the static and dynamic judgments. High scores based on a dynamic presentation (and thus involving kinematics) correspond to high scores based on static one (involving characteristics related to accuracy of trace) and inversely. This result supports our first hypothesis (cf. §3) based on the action/perception and product/process links described in

literature. As suggested by Freyd (1983), human could extract dynamic information in the perception of static forms. For recall, the author asked subjects to learn some artificial characters, drawn in real time, and then to recognize distorted versions of these characters presented statically. In accordance with her theory, subjects were faster on static character recognition when the distortion was consistent with the drawing method (Badcock & Freyd, 1988; Freyd, 1983). Our results showed the same underlying process and extended it to the measure of the product quality. Characters subjectively considered as well produced leads to a good rate of the character product. In other words, when we perform character evaluation of the quality in a static manner, we could also access to kinematics information and take it into account in our final judgment. The analysis of judges' comments on criteria they used during the subjective evaluation emphasizes the supposed combination between static and dynamic components for both static and dynamic presentations. As example in static judgments, the underlying criteria are mainly related to the shape ("a space between the center loop and the end is too big", "Dissymmetry between top and bottom") and aesthetic ("precise, nice character", "clear and precise") but are also present some dynamic components ("jerky writing", "several breaks in the letter"). In dynamic judgments, same dual process exists, the underlying criteria are mainly related to kinematics ("correct movement", "regular motion", "too quick/slow", "wrong strokes order") but also related to shape criteria ("too titled", "an additional stroke") and aesthetics ("nice realisation"). Same confusing frontier exists in normalized test such as BHK, where shape criteria (size, tilt, orientation) are combined with kinematics criteria (jerkiness, speed indicators, hesitance, etc.). To conclude, in accordance with our first hypothesis, a significant overlap between criteria initially considered as purely static and purely dynamic judgments exists.

Secondly, we tried to verify the feasibility of the classic distinction proposed in literature between static objective criteria related to shape and dynamic objective criteria related to kinematics of production (hypothesis 2, cf. §3). Our second set of results reveals that in majority, dynamic criteria are correlated together (e.g. number of velocity peaks, mean velocity, duration and number of pen up) the mean correlation coefficient is $r=.53$ in children and $r=.59$ in adults. Static criteria are also correlated together (Number of strokes, distance and DTW) the mean coefficient is $r=.29$ in children and $r=.33$ in adults. Due to the influence of gesture production on the product, correlation showed that several static criteria are linked to dynamic measures (e.g. distance with number of velocity peaks, DTW and total duration of the trajectory, etc.). The mean coefficient of correlation between static and dynamic objective criteria is about $r=.32$ in children and about $r=.34$ in adults. These second set of results emphasize the difficulty to classify criteria in the two main category used in literature (static or dynamic; product and process). Moreover, interesting difference in correlations between criteria is observed in children and adults. The correlation between distance and total duration disappears in adults production. We can suggest that this effect is mainly due to absence of isochrony in children production. The isochrony law was formulated for the first time by Binet & Courtier (1893). They found that the speed of movement remains constant regardless of size variations of trace to be produced. In adults, we observed behaviour in accordance with isochrony law: the more letter size is important, the more velocity increases to remain constant in gesture duration. In children, even if we observed an increase of the velocity to preserve duration of the production on larger letter, we still notice a correlation between distance of the path and the corresponding duration. This specific correlation suggests that children do not master all fine motor control

mechanisms and cannot already respect all handwriting motor rules. In regard with this result, one should understand that scripter expertise has to be carefully taken into account in character recognition and evaluation.

Then, we evaluated the link between subjective judgments and objective measures. We used the subjective judgments, traditionally considered as more accurate than their computerized corresponding scores, as criterion to be predicted in stepwise regression analysis. In adults, the resulting model for static judgments (mean static) reveals two predictive criteria: the DTW, classically considered as static information, and the mean velocity along the path, considered as dynamic information. The model for subjective dynamic judgment (mean dynamic) reveals three objective dynamic criterion as predictors, the number of velocity peaks, the mean velocity and the total duration of the path, and one static criteria as predictor, the DTW score. These models raise a number of issues. First of all, the mean velocity, often used in the literature for cinematic analysis, can explain the static judgment. Partial correlation reveals that the more the mean velocity of the production was important, the more the static judgment was low. Several assumptions can be made. (1) The judges have access to the dynamic component of the course by analyzing visual cues present in the trace. This hypothesis is supported by studies which showed activations of motor areas during observation of human movements (Saygin et al., 2004) or during observation of static pattern previously learned to be traced (Longcamp et al., 2003). Theories of motor simulation (Jeannerod, 2009) could also follow our direction. At last, Viviani (2002) assert that access to dynamic properties could occur through a motor representation of the act of writing. (2) In the static presentation modality, the judges have access to the size of the letter; they could deduce the calculation of mean velocity (by divided the distance by the duration). Nevertheless, participants had no access to duration information and the involvement of the distance was not notice in regression model. (3) This third assumption, referred to the close link between the spatial shape and the kinematics of production. In adults writing news characters, higher velocity production could mean poor letter shape. In this case, an obvious correlation would appear between dynamic and static criteria with no need of simulation or knowledge of handwriting motor rules.

Another significant result concerns the link between DTW and both static judgment and dynamic judgement. It seems that this objective measure, generally regarded as a method of static analysis of production, could also be taken into account for kinematics assessments of characters. Partial correlation reveals that the less the distance is important between the standard trajectory and the effective trajectory, the more important are the static or dynamic judgment scores. The link between DTW score and dynamic judgment score is not surprising. Indeed, the application of this algorithm is limited by computational initial condition such as the matching of the starting point and pen-up/pen down sub sequence computation. Thus, order of strokes production (not always respected in children handwriting, seen as a dynamic characteristic, is taken into account in the DTW computation. Same kind of relation between DTW methods and kinematics has been found by Di Brina (2008). We make the assumption that this index could be used as an overall indicator of the quality of handwriting production in is double assessment of spatial characteristics and kinematics features, as already suggested by several researches (Niels, 2004; Di Brina, 2008).

As introduced previously, developmental differences could also influence the choice of character recognition and evaluation criteria. In children, the resulting model for static

judgments (mean static) reveals two predictive criteria: the number of strokes and the distance classically considered as static information, and the designs copying scores used as an indication of children visuospatial and motor skills. Prediction from DTW on static judgment is not shown in children. This could be due to the fact that children do not always produce characters in the correct order. Indeed, DTW score is quite sensible to the order of strokes production but in static presentation this information is not available and could not be used by judges. The model for subjective dynamic judgment (mean dynamic) reveals two objective dynamic criteria as predictors, the number of pauses and the number of pen up, and one static criterion as predictor, the DTW score. As children movements are classically slower than movement that would have been performed by expert scribe, we suggest that pen up duration and number of pauses are probably the more prominent criteria for perceptual judgments. In contrast, in adults, the following objective dynamic predictors, the number of velocity peaks, mean velocity and duration seem to be more distinct indicators for handwriting fluency.

In conclusion, this research highlights the difficulty to classify criteria as clearly static or dynamic. Correlations amongst and between static and dynamic criteria, objective and subjective, are observed in both children and adult populations. These results moderate existing classifications considering criteria as more related to static or more related to dynamic information. Moreover, dynamics criteria considered in children and adults production are not the same and do not have the same meaning, probably due to the differences in motor production skills. Finally, subjective evaluation which can be seen as more relevant in character recognition and evaluation tasks is linked with objective criteria but differs amongst tested populations. In definitive, the best way to perform handwriting character recognition and evaluation would be an evaluation including a large sample of both spatial and dynamic criteria as suggested by human performance classification (taking into account each type of performance criterion of maximum certainty of achieving the goal type, minimum energy expenditure type, and minimum completion time type) in either objective or subjective evaluations.

6. Acknowledgments

The authors gratefully thank all participants (scribes and judges) for their implication in this research. We also thank Sébastien Boisard for the development of the subjective data collection software and his help in data analysis, and Francois Branchon for his english review.

7. References

- Anderson, S. W., Damasio, A. R. & Damasio, H. (1990). Troubled letters but not numbers: Domain specific cognitive impairments following focal damage in frontal cortex. *Brain*, 113, 749-766.
- Babcock, M. K. & Freyd, J. J. (1988). Perception of Dynamic Information in Static Handwritten Forms. *The American Journal of Psychology*, 101(1), 111-130.
- Bara F. and Gentaz, E. (2010) Apprendre à tracer les lettres : une revue critique. *Psychologie Française*, In Press, Corrected Proof, Available online 24 February 2010, doi:10.1016/j.psfr.2010.01.001

- Barriere, C. & Plamondon, R. (1998). Human identification of letters in mixed-script handwriting: an upper bound on recognition rates, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B*, 28(1), 78-81.
- Bartlett R., Wheat J. & Robins M. (2007). Is movement variability important for sports biomechanists? *Sports Biomechanics*, 6(2), 224-243.
- Bartolomeo, P., Bachoud-Lévi, A.-C., Chokron, S. & Degos, J.-D. (2002). Visually- and motor-based knowledge of letters: Evidence from a pure alexic patient. *Neuropsychologia*, 40, 1363-1371.
- Binet, A. & Courtier, J. (1893). Sur la vitesse des gestes graphiques [On the speed of voluntary movements]. *Revue Philosophique*, 35, 664-671.
- Blöte, A. & Hamstra-Bletz, L. (1991). A longitudinal study on the structure of handwriting. *Perceptual and Motor Skills*, 72, 983-994.
- Bluteau, J., Coquillart, S., Payan, Y. & Gentaz, E. (2008). Haptic guidance improves the visuo-manual tracking of trajectories. *PLoS ONE*, 3(3), e1775.
- Bruinsma, C. & Nieuwenhuis, C. (1991). A new method for the evaluation of handwriting material. In A. M. Wann, Wing & N. Sovik (Eds.), *Development of Graphic Skills* (pp. 41-51). New York: Academic Press.
- Cohen, E. (1991). Understanding handwritten text in a structured environment: determining zip codes from addresses', *International journal of pattern recognition and artificial intelligence*, 1(2), 221-264.
- Di Brina, C. D., Niels, R., Overvelde, A., Levi, G. & Hulstijn, W. (2008). Dynamic time warping: A new method in the study of poor handwriting. *Human Movement Science*, 27(2), 242 - 255.
- Ellis, A. W. & Young, W. (1988). *Human Cognitive Neuropsychologie*. London: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Ernst, M. O. & Bühlhoff, H. H. (2004). Merging the senses into a robust percept. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(4), 162-169.
- Flores d'Arcais, G. B. (1994). Order of strokes writing as a cue for retrieval in reading Chinese characters. *European Journal of Cognitive Psychology*, 6, 337-355.
- Franks, I. M., Wilberg, R. B. & Fishburne, G. J. (1982). Consistency and error in motor performance. *Human Movement Science*, 1(2), 109 - 123.
- Fredembach B., Hillairet de Boisferon A., Gentaz E. (2009) Learning of Arbitrary Association between Visual and Auditory Novel Stimuli in Adults: The "Bond Effect" of Haptic Exploration. *PLoS ONE* 4(3): e4844. doi:10.1371/journal.pone.0004844
- Freeman, F. N. (1959). A new handwriting scale. *Elementary School Journal*, 59, 218-221.
- Freyd, J. J. (1983). Representing the dynamics of a static form. *Memory and Cognition*, 11, 342-346.
- Gentile AM. Skill acquisition: action, movement, and neuromotor processes. In: Carr JH, Shepherd RB, editors. *Movement science foundations for physical therapy in Rehabilitation*. 2nd ed. Gaithersburg: Aspen, MD; 2000. p.111-187.
- Goodnow, J. J. & Levine, R. A. (1973). "The grammar of action ": Sequence and syntax in children's copying. *Cognitive Psychology*, 4, 82-98.
- Graham, S., Berninger, V., Abbott, R., Abbott, S. & Whitaker, D. (1997). Role of mechanics in composing of elementary school students: A new methodological approach. *Journal of Educational Psychology*, 89, 170-182.

- Graham, S., Berninger, V. W. & Weintraub, N. (1998). The relationships between handwriting style and speed and legibility. *Journal of Educational Research*, 5, 290-296.
- Guinet, E. & Kandel, S. (2010). Ductus: A software package for the study of handwriting production. *Behavior Research Methods*, 42, 326-332.
- Guthrie, E. (1952). *The psychology of learning*. Peter Smith Publication Inc.
- Hamstra-Bletz, L., DeBie, J. & Den Brinker, B. (1987). *Concise Evaluation Scale for children's handwriting*. Lisse, Swets & Zeitlinger.
- Hamstra-Bletz, L. & Blöte, A. W. (1990). Development of handwriting in primary school: A longitudinal study. *Perceptual and Motor Skills*, 70, 759-770.
- Higgins, J. & Spaeth, R. (1972). The relationship between consistency of movement and environmental conditions. *Quest*, 17, 61-69.
- Hillairet de Boisferon, A., Bara, F., Gentaz, E., & Colé, P. (2007). Préparation à la lecture des jeunes enfants: Effets de l'exploration visuo-haptique des lettres et de la perception visuelle des mouvements d'écriture. *L'Année Psychologique*, 107, 537-564.
- Hulme, C. (1981). *Reading retardation and multisensory teaching*. Londres: Routledge & Kegan Paul.
- Jeannerod, M. (2009). *Le cerveau volontaire*. Odile Jacob.
- Korkman, M., Kirk, U. & Kemp, S. A. (1998). *Developmental Neuropsychological Assessment*. The Psychological Corporation: San Antonio.
- Kruskall, J. & Liberman, M. (1983). The symmetric time warping problem: From continuous to discrete. In *Time Warps, String Edits and Macromolecules: The Theory and Practice of Sequence Comparison*, 125-161, Addison-Wesley.
- Longcamp, M., Anton, J. L., Roth, M. & Velay, J. L. (2003). Visual presentation of single letters activates a premotor area involved in writing. *Neuroimage*, 19, 1492-1500.
- Longcamp, M., Zerbato-Poudou, M. T. & Velay, J. L. (2005). The influence of writing practice on letter recognition in preschool children: A comparison between handwriting and typing. *Acta Psychologica*, 119, 67-79.
- Niels, R. (2004). *Dynamic Time Warping: An Intuitive Way of Handwriting Recognition?* Master's thesis, Radboud University Nijmegen.
- Palluel-Germain, R., Bara, F., Hillairet de Boisferon, A., Hennion, B., Gouagout, P. & Gentaz, E. (2007). A visuo-haptic device - Telemaque - increases the kindergarten children's handwriting acquisition. *IEEE WorldHaptics*, 72-77.
- Plamondon, R., Srihari, S., Polytech, E. & Montreal, Q. (2000). Online and off-line handwriting recognition: a comprehensive survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(1), 63-84.
- Rosenblum, S., Weiss, P. L. & Parush, S. (2003). Product and Process Evaluation of Handwriting Difficulties. *Educational Psychology Review*, 15(1), 41-81.
- Saygin, A. P., Wilson, S. M., Hagler, J., Bates, E. & Sereno, M. I. (2004). Point-Light Biological Motion Perception Activates Human Premotor Cortex. *Journal of Neuroscience*, 24(27), 6181-6188.
- Schmidt, R. A. & Lee, T. D. (1987). *Motor Control and Learning: A Behavioral Emphasis*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Schmidt, R. A. & Wrisberg, C. A. (2000). *Motor Learning and Performance*. Human Kinetics Publishers.

- Seki, K., Yajima, M. & Sugishita, M. (1995). The efficacy of kinesthetic reading treatment for pure alexia. *Neuropsychologia*, 33, 595-609.
- Shams, L. & Seitz, A. R. (2008). Benefits of multisensory learning. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(11), 411-417.
- Thorndike, E. L. (1910). Handwriting. *Teacher College Record*, 11, 83-175.
- Van Galen, G. (1991). Handwriting: Issues for a psychomotor theory. *Human Movement Science*, 10(2), 165-191.
- Viviani, P. & Terzuolo, C. (1982). Trajectory determines movement dynamics. *Neuroscience*, 7(2), 431-437.
- Viviani, P. (2002). *Common Mechanisms in Perception and Action: Attention and Performance*. Oxford University Press, New York, chapter Motor competence in the perception of dynamic events: a tutorial, pp. 406-443.
- Zesiger, P. (1995). *Ecrire : Approche cognitive, neuropsychologique et développementale*. Paris: Presses universitaires de France.

Résumé

Pour apprendre à lire dans un système d'écriture alphabétique, les enfants doivent comprendre que les lettres (graphèmes) de l'écrit représentent les sons (phonèmes) de l'oral. Comprendre et apprendre ces nouvelles associations ainsi qu'automatiser leur utilisation nécessite plusieurs années d'enseignement spécifique. Des études ont montré que des méthodes précoces de préparation aux apprentissages qui renforcent les liens entre les compétences perceptives et motrices sollicitées lors de l'apprentissage conjoint de la lecture et de l'écriture seraient particulièrement efficaces. L'objectif principal de ce travail a été de comprendre la manière dont une exploration manuelle haptique de lettres cursives favorisait le décodage de pseudo-mots et la fluidité des tracés chez des enfants de grande section de maternelle. Nous avons donc comparé des entraînements multisensoriels, impliquant la modalité haptique et visuelle dans le travail d'exploration des lettres, à des entraînements unimodaux visuel ou haptique. Ce travail a été réalisé à travers deux axes : d'une part, chez des enfants de grande section de maternelle confrontés aux graphèmes et phonèmes, et d'autre part, chez des adultes confrontés à un nouvel apprentissage de formes abstraites et stimuli auditifs totalement inédits. Les résultats révèlent que l'activité motrice autour des lettres et des formes abstraites ne permet pas, malgré des mouvements d'exploration intimement liés à leur configuration spatiale, de favoriser leur mémorisation. Toutefois, nous mettons en évidence de manière robuste un meilleur apprentissage des associations entre les formes et les sons après une exploration visuelle et haptique des formes. De surcroît, cette amélioration ne serait pas uniquement due à la séquentialité de l'exploration induite par la modalité haptique, mais bien à la motricité elle-même. La modalité haptique pourrait donc servir de « ciment » entre les stimuli visuels et auditifs. Enfin, familiariser les enfants au geste d'écriture de lettres cursives, via une exploration haptique guidée (par un bras robot à retour de force), permet d'améliorer la fluidité de l'écriture. Présenter un patron de lettre à la fois statique et dynamique permettrait aux enfants d'assimiler certaines règles motrices de production (ordre de production, cinématique) et d'acquérir une représentation motrice plus complète de la lettre. L'ensemble des résultats suggère une influence significative de l'exploration haptique de lettres dans l'apprentissage de la lecture et de l'écriture et encourage donc sa prise en compte dans des entraînements visant à préparer ces apprentissages.

Mots-clés : Entraînement multisensoriel ; Apprentissages ; Lecture ; Ecriture ; Lettres ; Modalité haptique

Abstract

Learning to read in an alphabetic system requires children to understand that letters (graphemes) in written language correspond to sounds (phonemes) in oral language. To learn these novel associations requires several years of specific instruction. Using some methods early on to prepare children for this seems efficient, where the methods are designed to reinforce the link observed between perceptive and motor abilities during reading and handwriting acquisition. The main goal of this work was to understand the way manual haptic exploration of cursive letters can enhance pseudo-words decoding and handwriting fluidity in letters production in senior kindergarten children. To do so, we compared multisensory trainings involving haptic and visual modalities, in the proposed motor activities around the letters, to visual or haptic unisensory trainings. This work was realised according to two axes: for the first, in senior kindergarten children shown graphemes and phonemes, and for the second, in adults shown a new learning of unseen abstract forms and auditory stimuli. Results reveal that motor activity around letters and abstract forms does not enhance participant's memorisation despite exploratory motions intimately related to their shapes. Nevertheless, we showed in a robust way a more important associative learning of letters and sounds after a visuo-haptic exploration of letters. In addition, this enhancement is not only due to a more sequential exploration induced by the haptic modality but more to the motor activity *per se*. Haptic modality could be at the origin of a "binding" effect between visual and auditory stimuli. Finally, getting children into the habit of handwriting motion of cursive letters via a haptic exploration (arm robot device), enhances their handwriting fluidity. Demonstration of a static and dynamic model of letters could help children in the acquisition of some motor rules production (as strokes order and kinematics) and in the construction of more complete motor representations of letters. Taken together, results suggest a significant impact of the haptic exploration of letters in acquiring the skills of reading and handwriting and add weight to the suggestion that haptic exploration should be used in training programs designed to prepare children for acquiring these skills.

Key words: Multisensory training; Acquisition; Reading; Handwriting; Letters; Haptic modality